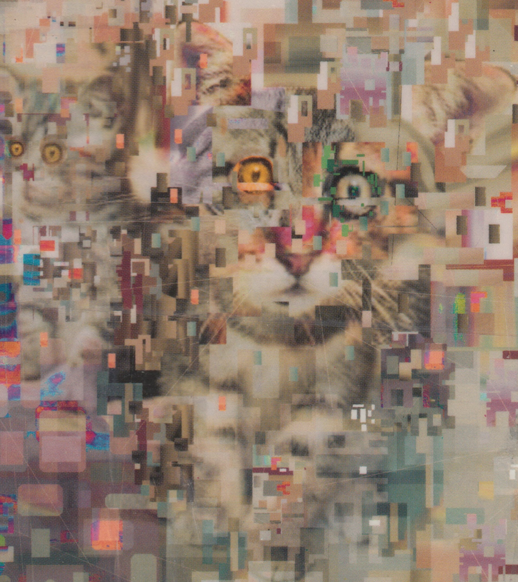
JOHN GRIBBIN

Schrödinger'in Yavru Kedileri

GERÇEKLİĞİN PEŞİNDE



metis bilim | 6

JOHN GRIBBIN

Schrödinger'in Yavru Kedileri

İngiliz bilim yazarı John Gribbin Cambridge Üniversitesi'nde astrofizik eğitimi gördükten sonra bilimin çeşitli yönlerini indirgemeden popülerleştiren, bilimci kimliği taşımayan pek çok okuru bilimin hemen her alanındaki son gelişmeler hakkında bilgilendiren çok sayıda yazı ve kitap kaleme aldı. *Nature* ve (halen fizik danışmanlığı görevini yürüttüğü) *New Scientist* gibi bilim dergilerinin yanı sıra, *The Times*, *The Guardian* ve *The Independent* gibi gazetelerde de bilim hakkında yazıları yayımlandı ve yazdığı kitaplarla hem Britanya'da hem de ABD'de ödüller kazandı. BBC radyosu için çeşitli bilim programları hazırlayıp sunan Gribbin televizyonlarda yayınlanan çeşitli bilim programlarına da danışmanlık yapmıştır. Halen Sussex Üniversitesi Astronomi bölümünde konuk öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır. *Double Planet* (1988) ve *Innervisions* (1993) gibi birkaç bilimkurgu romanı da yayımlayan Gribbin asıl ününü 1984'te yayımlandığında büyük ilgi gören *Schrödinger'in Kedisinin Peşinde*'nin ardından peş peşe yazdığı popüler bilim kitaplarıyla kazanmıştır. Bu kitaplar arasında başlıcaları şunlar: *In Search of the Big Bang* (1986), *The Matter Myth* (Paul Davies'le birlikte, 1991), *Stephen Hawking: Bilim Dünyasında Bir Hayat* (1992/2005), *In Search of the Edge of Time* (1992), *Einstein: Bilim Dünyasında Bir Hayat* (Michael White'la birlikte, 1994/2005), *Darwin: Bilim Dünyasında Bir Hayat* (1995/2008), *Schrödinger'in Yavru Kedileri* (1996/2008), *Origins* (1997), *The Search for Superstring, Symmetry and the Theory of Everything* (1999), *The First Chimpanzee* (2001), *The Human Genome* (2002), *Deep Simplicity* (2005).



Metis Yayınları
İpek Sokak 5, 34433 Beyoğlu, İstanbul
Tel: 212 2454696 Faks: 212 2454519
e-posta: info@metiskitap.com
www.metiskitap.com

Schrödinger'in Yavru Kedileri
Gerçekliğin Peşinde
John Gribbin

İngilizce Basımı: Schrödinger's Kittens
And the Search for Reality
The Guernsey Press Co. Ltd, Guernsey, C.I., 1997

Birinci Basım: Nisan 2008

Yayıma Hazırlayan: Özde Duygu Gürkan

Kapak İllüstrasyonu: Emine Bora

Dizgi ve Baskı Öncesi Hazırlık: Metis Yayıncılık Ltd.
Baskı ve Cilt: Yaylacık Matbaacılık Ltd.
Fatih Sanayi Sitesi No. 12/197-203
Topkapı, İstanbul Tel: 212 5678003

ISBN-13: 978-975-342-664-0

JOHN GRIBBIN

Schrödinger'in Yavru Kedileri

GERÇEKLİĞİN PEŞİNDE

Çeviren:

Nedim Çatlı

metis

İçindekiler

Elli yıl canla başla kafa yorduktan sonra "Işık zerrecikleri nedir?" sorusunun cevabına bir adım bile yaklaşabilmiş değilim. Bugünlerde her önüne gelen bunu bildiğini sanıyor, ama yanılıyor.

ALBERT EINSTEIN
M. Besso'ya Mektup, 1951

Zihnin düşünce sürecine tabi olan görünür, temel duyu izlenimlerinin ötesinde fiziksel bir dünya mevcut değildir.

GEORGE BERKELEY
İnsan Bilgisinin İlkeleri Üzerine, 1710

Kabile nağmesi düzmenin altmış dokuz yolu var,
Her biri de doğru yoldur!

RUDYARD KIPLING
In the Neolithic Age, 1895

Teşekkür

Böyle bir kitabın yazılması, bilimsel makalelerinden –çoğu kez daha yayımlanmadan– yararlanmamı sağlayan pek çok sayıda bilim insanının iyi niyetiyle mümkün olmuştur. Bütün bu bilgi kaynakları metinde anılıyor, fakat kendileriyle yaptığım tartışmalar ve yazışmaların kuantum kuramı hakkındaki fikirlerimin gelişmesinde oynadığı rol açısından bazı isimleri özellikle anmam gerekiyor. Alfabetik sırayla özellikle teşekkür etmek istediklerim: Bruno Augenstein, RAND, Santa Monica; Şu-Yuan Çu, Kaliforniya Üniversitesi, Riverside; John Cramer, Washington Üniversitesi, Seatle; Paul Davies, Adelaide Üniversitesi; Dipankar Home, Bose Enstitüsü, Calcutta; Geoff Jones, Sussex Üniversitesi; Martin Krieger, Güney Kaliforniya Üniversitesi, Los Angeles ve Thanu Padmanabhan, Tata Enstitüsü, Bombay.

Sussex Üniversitesi beni Astronomide Misafir Araştırmacı olarak kabul edip mükemmel bir bilimsel kütüphaneye ve internete daha geniş imkânlarla erişmemi sağlayarak öteki kitaplarıma yaptığı yardımdan daha fazlasını sunmuştur. Öte yandan Sussex'teki astronomlar pek geleneksel olmayan fikirlerimden bazılarını dinleyerek görüşlerini söylemiştir. Tüm bu insanlar olmadan bu kitap ortaya çıkamazdı.

Sunuş

On yıl önce yayımlanan kitabımda kuantum kuramının tarihsel gelişimini yazarken, başka bir kitapta tekrar kuantum gizemleri temasına döneceğim aklımın ucundan bile geçmemişti. *Schrödinger'in Kedisinin Peşinde*'yi yazarken kuantum fiziğinin atomaltı dünyasının ne kadar garip ve gizemli olduğunu, tuhaf deney sonuçlarının sağduyuyla örtüşmeyen kuramları yaratması ve bunların da başka deneylerle doğrulanması sonucu oluşan ve fizikçileri böylesi tuhaf kavramları ciddiye almaya zorlayan o kusursuz mantığı da ortaya koymak için yola çıkmıştım. 1980'lerin ortaları itibariyle önemli olan şey bütün garipliklerine rağmen kuantum kuramının işe yarıyor olmasıydı – zira lazerlerin, bilgisayar çiplerinin, DNA molekülünün ve daha pek çok şeyin nasıl çalıştığını anlamamızı sağlayan kuram buydu. "Klasik" fizik denen eski fikirler böyle fenomenleri asla açıklayamaz. *Schrödinger'in Kedisinin Peşinde*'de vurguladığım gibi, önemli olan kuantum kuramının zor anlaşılır olması değil, enikonu işe yarıyor olmasıydı. Richard Feynman'ın dediği gibi "hiç kimse"nin "kuantum kuramını anlamıyor" olması önceki kitabımı, "Sizi boşlukta, iç gıcıklayan imalarla ve daha anlatılmamış hikâyelerle bırakmak"tan memnun olduğum yolundaki o utanmaz ifadeyle bitirebileceğim anlamına geliyordu.

Fakat ben sizi boşlukta bırakmaktan memnunken pek çok fizikçi de o güne kadarki başarısıyla yetinmiyordu. İşe yarasa bile anlaşılmayan bir kuramdan hoşnut olmayınca, benim meseleyi en son değerlendirdiğim 1984 yılından bu yana kuantum gizemlerini çözmek için canla başla uğraşıyorlar. Bu süre içinde bazı gizemleri daha da gizemli hale getirip kuantum dünyasındaki garipliğin yeni yanlarını açığa çıkardılar. Kuantum gizemlerinin, dışarıdan bakanlar için gittikçe tuhaflaşan, çaresizlikten doğmuşa benzeyen açıkla-

malarını geliştirdiler. Fakat aynı zamanda, son birkaç yıl içinde, altmış yılı aşkın bir çabanın sonunda nihayet neler olup bittiği hakkında hakiki bir kavrayışı sağlayabilecek bir açıklama buldular – sadece işin erbabına değil, gerçekliğin doğasıyla ilgilenen herkese anlaşılır gelen bir kavrayış.

Bu yeni kavrayışın temeli sadece kuantum kuramının uygun yorumuna değil, aynı zamanda ışığın davranışının Albert Einstein'ın görelilik kuramı çerçevesinde açıklanışına dayalıdır. Bu kitapta iki hikâyeyi de güncelleyip Evrenin nasıl işlediğini en iyi şekilde açıklamak ve bütün kuantum gizemlerinin çözümünü bulmak için kuantum fikirleriyle görelilik kuramı fikirlerini bir araya getirmek gerektiğini gösteriyorum.

Kuantum kuramının gelişimiyle ilgili tarihsel arka plana dair pek bir şey bulamayacaksınız; bunu zaten işlemiştim. Kuantum kuramına rüştünü ispat etmiş bir kuram olarak başlayıp bazı yeni bulmacaları ve bazı eski bulmacalara yeni bakış tarzlarını ele alıyorum, sonra da bu bulmacaların nasıl çözülebileceğini açıklıyorum. Bırakın benim kitaplarımı, konu hakkında herhangi bir şey okumuş olun ya da olmayın kuantum tartışmasını anlamak için bilmeniz gereken her şeyi burada *bulacaksınız*; aynı anda iki ayrı yerde olabilen fotonlar (ışık parçacıkları) gibi görünüşte paradoksal fenomenleri, aynı anda iki yöne giden atomları, ışık hızıyla hareket eden bir parçacık için zamanın nasıl durduğunu ve kuantum kuramının Uzay Yolu'vari bir ışınlanmayı mümkün kılabileceğine dair ciddi bir yorumu okuyacaksınız.

Sahneyi kurmak için aşağı yukarı *Schrödinger'in Kedisinin Peşinde*'nin kaldığı yerden başlıyorum, yani o ünlü kedinin kendisi ve John Bell'in kanıtladığı şu olguyla: Kuantum varlıkları bir kere tek bir sistemin parçası olunca sonrasında da birbirleriyle bağlantılı kalırlar, birbirlerinden çok uzakta bile olsalar bir şekilde birbirlerinin farkındadırlar. Einstein buna "hayalet işi uzaktan etki" diyordu; daha saygın bir ifadeyle "yerbilmezlik" (*non-locality*). Kavramlar sizin için yeni olabilir ya da aşina geldiğini düşünebilirsiniz. Schrödinger'in kedisi "paradoksu", aynı anda hem canlı hem ölü olması, son on yıldır neredeyse beylik bir söz oldu. Ama durun. Artık ezberlediğinizi düşünüyorsanız bile yeniden düşünmeye hazırlanın. Daha ne gördünüz ki! Kusursuz deneylerle desteklenmiş, sizi şaş-

kına çevirecek daha büyük ve daha iyi paradokslarım var. Fakat sonuçta hepsi tek bir kapıya çıkıyor. Örneğin bir elektron, iki delik deneyinde nasıl aynı anda iki yerden birden geçebiliyor? Bütün deneyin zamanın tek bir anındaki yapısını nasıl "biliyor"?

Kuantum dünyasının topyekûn garipliği, çözmemiz gereken problem, en açık şekilde baştaki kedimizin ikiz yavrularının, yani kitabın başlığındaki yavru kedilerin maceralarına bakarak anlaşılabilir. O halde ışığın doğası hakkında bildiklerimizi, yani hem kuantum kuramının hem de görelilik kuramının kilit öğesi olan fenomeni gözden geçirmemiz gerek. Ancak ondan sonra size gerçekliğin doğasını açıklayan ve kuantum gizemlerini *–bütün* kuantum gizemlerini– çözen yeni fikirleri sunabilirim. Kuantum kuramının 1920' lerin ortalarında ilk çıktığı zamandan bu yana artık ilk defa belli bir güvenle kuantum kuramının *ne anlama geldiğini* söylemek mümkün. Eğer yeni bir kitap yazmak için bu da geçerli bir sebep değilse, artık nedir bilmiyorum.

John Gribbin
Nisan 1994

Önsöz

Sorun

Kuantum kuramının temelindeki gizem iki delik deneyi içinde saklıdır. Bunu ben söylemiyorum; kendi kuşağının en büyük fizikçisi olan Richard Feynman ünlü eseri *Lectures on Physics*'in (Fizik Üzerine Dersler) kuantum mekaniğine ayırdığı ilk bölümünün ilk sayfasında söylüyor.[1] Feynman, kuantum fiziğini Isaac Newton ve onun izinden giden bilim insanlarının klasik fikirleriyle karşılaştırırken bu fenomen için, "herhangi bir klasik yöntemle açıklamak imkânsız, *kesinlikle* imkânsız" diyordu. Bu deney "içerisinde kuantum mekaniğinin kalbini taşıyor. Aslında, mevcut olan *tek* gizemi barındırıyor." *Fizik Yasaları Üzerine* adlı başka bir kitapta da şöyle söylüyordu: "Anlaşılan o ki, kuantum mekaniğindeki diğer bütün durumlar daima şöyle açıklanabilir: 'İki delik deneyindeki olayı hatırlıyor musun? İşte aynı şey.'" Ben de Feynman gibi iki delik deneyiyle başlıyorum, daha başta temel gizemi bütün ihtişamıyla ortaya koyuyorum. Deney bildik gelebilir, fakat bildik gelmenin asla küçümsemeye sebep olmayacağı bir durum bu. İki delik deneyi hakkında ne kadar çok şey bilirseniz o kadar gizemli görünür.

Bu deneyle okuldaki fizik laboratuvarında karşılaştıysanız muhtemelen hiç gizemli görünmemiştir. Zira hiç kimse oradaki gizemleri size açıklama zahmetine girmemiştir (ya da cesaret edememiştir); bunun yerine çok büyük bir ihtimalle size tüm öğretilen şundan ibarettir: Bir kartondaki iki dar yarıktan geçen ışığın davranışı ve

1. "Kuantum kuramı", "Kuantum fiziği", "Kuantum mekaniği" terimlerini aynı anlamda kullandım; metinde adı geçen kitapların tam künyeleri Kaynakça'da verilmiştir.

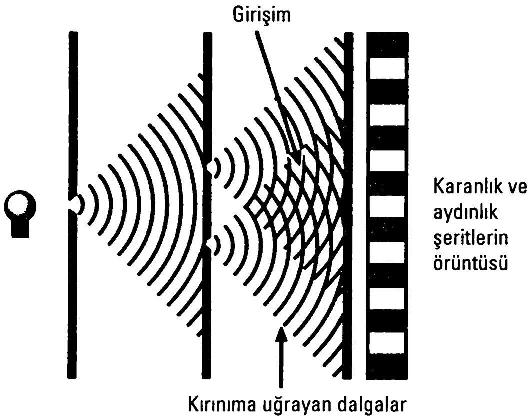
arkadaki perdede bir aydınlık bir karanlık şeritten bir örüntü oluşturması ışığın bir dalga gibi hareket ettiğinin gayet şık bir ispatıdır.

Bu kısım doğru. Fakat tam gerçeği yansıtmıyor.

Fantastik Işık

Klasik dalga örneği durgun bir gölcüğe tek bir çakıl taşı bıraktığınızda suyun yüzeyinde gördüğünüz şeydir. Dalgalar çakıl taşının düştüğü yerden başlayarak dışarıya doğru halkalar halinde bir dizi dalgacık oluşturur. Bu haldeki dalgalar, her biri dalgacıkların dalga boyundan çok daha küçük iki deliği olan bir engelle karşılaşırsa, o zaman dalgalar engelin öteki tarafında iki deliğin merkezinden iki yarım küre halinde yayılırlar. Oluşturdukları örüntü, durgun gölcüğe aynı anda iki çakıl taşı attığınız zaman elde edeceğiniz dalgacık örüntüsünün yarısı gibidir.

Bunun ne tür bir örüntü olduğunu herkes bilir. Gölcüğe iki taş atarsanız gerçekten birbiri içine geçen iki dairesel dalgacık grubu göremezsiniz. Bunun yerine iki dairesel örüntünün birbiriyle giri-



1 İlk delikten gelen *homojen* ışık ikinci perdedeki her bir delikten aynı *fazda* ileri yayılan dalgalar oluşturur. Bunlar girişim yaparak son perde üzerinde aydınlık ve karanlıktan oluşan belirgin bir örüntü meydana getirir – ışığın dalga halinde yol aldığının kesin kanıtı.

şiminin sebep olduğu daha karmaşık bir dalgacık örüntüsü çıkar ortaya. Bazı yerlerde iki dalgacık grubu birbirine eklenerek daha büyük dalgacıklar oluşturur; bazı yerlerdeyse iki dalgacık grubu birbirini yok ederek suda ya hiç dalga hareketi bırakmaz ya da çok az bırakır.

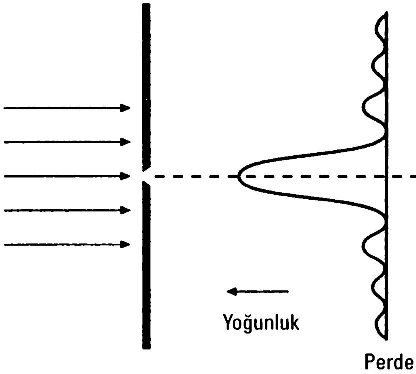
Işık bir kartondaki iki delikten parlayıp kartonun öteki yanındaki perdede bir örüntü yaratınca tamı tamına aynı şey olur. Bu etkinin en açık şekilde görülmesi için tek bir saf renk ışık kullanmak en iyisidir, bu da tek bir dalga boyu demektir. İki ışık dalgası çifti gölcükteki dalgacıklar gibi iki delikten dışarı yayılırlar, ışık perdeye ulaşınca da dalgaların birbirlerine eklenmesine (yapıcı girişim) ve dalgaların birbirlerini yok etmesine (yıkıcı girişim) karşılık gelecek şekilde bir dizi açık ve koyu şeritten (girişim saçakları) oluşan bir örüntü ortaya çıkarır. Hepsi yalın, kolay anlaşılır lise fiziği. Buradan sadece ışığın dalga olduğunu değil, girişim saçaklarının arasındaki mesafeyi ölçerek dalga boyunu da bulmak oldukça basit.

Fakat bu seviyede bile işin içinde incelikler var. Perdede elde ettiğiniz örüntü iki delikten ışığı sırayla saldığınızda perdeye düşen ışığın parlaklıklarının toplamına eşit *olmaz*. Girişimin işleyişindeki kilit noktalardan birisi budur. Tek bir delik açıkken sadece o deliğin arkasında bir ışıklı bölge görürsünüz; sadece öteki delik açıkken yeni bir ışıklı bölge. Bu iki etkiyi toplamak daha büyük bir ışıklı bölge yaratır. Fakat girişim demek, ışık iki delikten de aynı anda geçerken perdedeki örüntünün daha karmaşık olması demektir – bunun en önemli sebebiyse, örüntünün en parlak kısmının, iki delik ayrı ayrı açık olduğunda perdede elde edeceğiniz iki parlak noktanın ortasına düşmesidir, tam da karanlık bir gölge görmeyi umduğunuz yere.

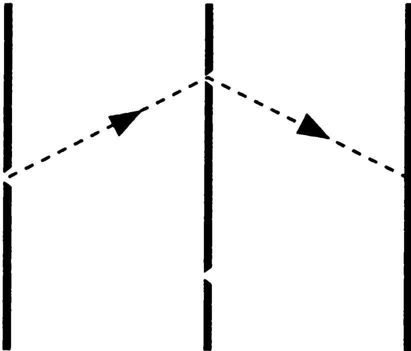
Buraya kadar her şey tamam. Işık dalgadır. Fakat bu basit resimde ışığın foton adı verilen parçacıklardan oluştuğuna dair de çok iyi bir delil var. Gündelik tecrübelerimize göre bir duvardaki iki delikten parçacıkların geçme şekli dalgaların duvardaki deliklerden geçiş şeklinden çok farklıdır.

Diyelim ki bu iki delik gerçekten bir duvardaki iki delik. Siz de elinizde koca bir yığın taşla duvarın bir yanında durup duvara doğru, hedefe tam isabeti dert etmeden her seferinde bir taş atıyorsunuz. Taşlardan bazısı bir delikten geçer, bir kısmı da öteki delikten

ve böylece duvarın arkasında iki yığın oluştururlar. Bu örüntü (iki taş yığını), taş atma süresinin yarısında bir deliği, öteki yarısında öteki deliği kapatmış olmanız durumunda ortaya çıkacak örüntüyle aynıdır. Katı duvarın hemen arkasında, iki deliğin ortasında bir yerlerde birikmiş bir taş yığını kesinlikle bulamazsınız. Deliklerden bir kerede bir parçacık geçince bunlar birbirleriyle girişim *yapmazlar*.



2 Tek bir delikten geçen elektron demeti, elektronların çoğunun delik hizasında yığıldığı bir dağılım oluşturur. Bir parçacık demetinin yapması beklenen şey budur.



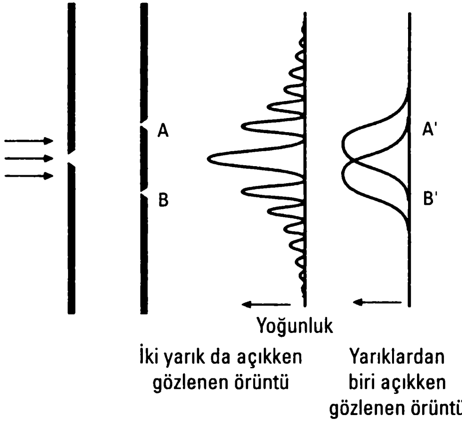
3 Çift deliğin birinden geçen bir elektronun ya da fotonun tek bir delikten geçiyormuş gibi davranması gerekir, tabii sağduyu haklıysa. Sağduyuya göre ikinci deliğin var olmasının hiçbir etkisi olmaması gerekir.

Tabii deliklerden pek çok parçacık aynı anda geçiyorsa, o zaman birbirlerine çarpa çarpa öteki tarafta farklı bir örüntü oluşturacak şekilde birbirleriyle girişimde bulunabileceklerini anlamak zor değil. Ne de olsa suyun da parçacıklardan –su moleküllerinden– meydana geldiği fikrine aşinayız; halbuki bu durum dalgacıkların bir gölcük üzerinde uslu dalgalar oluşturmasına engel olmuyor. Aynı şekilde lambadan çıkan bir foton selinin de iki delikten geçerken bir dalga gibi hareket etmesinin mümkün olacağını düşünebiliriz. Fakat *tek* fotonların iki delikli düzenekten teker teker geçtiklerinde olanları görünce gizem daha da derinleşiyor.

Bu deneyin 1980'lerin ortalarında Paris'te çalışan bir grup tarafından gerçekten yapıldığını vurgulamak gerekir. İki delik deneyinde tek fotonların geçişlerini ve kendileriyle girişimde bulunmalarını fiilen izlemişlerdir. *Schrödinger'in Kedisinin Peşinde*'yi yazdığımda ışığın bu şartlar altındaki davranışına dair delil çok güçlüydü, fakat doğrusunu söylemek gerekirse hâlâ biraz ikincil bir delildi. Oysa şimdi şüphe gölgesini aştık ve deneyde tek bir foton geçerken ne olduğunu *biliyoruz*.

Tabii aslında bizim bütün gördüğümüz, ışığın iki delikten geçtikten sonra perdede yaptığı örüntüden ibaret. Işık kaynağının iyice kısılıp her seferinde sadece tek bir fotonun çıkıp deney düzeneğinden geçtiğini düşünün (büyük beceri ve gelişmiş aletler gerekse de artık fizikçiler bunu yapabiliyorlar). Şimdi de iki deliğin öteki tarafındaki perdenin her gelen fotonu beyaz bir nokta olarak kaydeden bir fotoğraf plakası olduğunu farz edin. Fotonlar düzenekten tek tek geçerken her seferinde umduğunuz şeyi görürsünüz – tek bir foton ışık kaynağından çıkar ve fotoğraf plakasında tek bir beyaz nokta oluşturur. Fakat ilkin yüzlerce, sonra binlerce, sonra milyonlarca foton düzenekten geçmeye başladıkça karşınıza muhteşem bir görüntü çıkar. Fotoğraf plakasındaki o tek tek beyaz noktalar tıpkı tipik dalga girişiminde olduğu gibi aralarında karanlık şeritler bırakarak bir araya toplanıp parlak şeritler oluştururlar.

Her foton yola bir parçacık olarak çıkıp yine bir parçacık olarak varsa da, iki delikten aynı anda geçmiş ve kendisiyle girişim yapıp film üzerinde tam olarak nereye yerleşeceğini hesaplayarak genel girişim örüntüsüne kendi minik katkısını sunmuş gibi görünmektedir. Bu davranış iki gizem içermektedir. İlki, foton iki delikten aynı za-



4 Fakat hem elektronlar hem de fotonlar öteki deliğin varlığının farkındaymış gibi davranırlar. İki delik de açıkken gördüğümüz örüntü, deliklerin tek tek açık olduğu zaman elde edeceğimiz örüntülerin birleştirilmesiyle aynı değildir. Elektronların gerçekten dalga olduğu anlamına mı geliyor bu?

manda nasıl geçer? İkincisi, hadi bu numarayı yaptı diyelim, bütün örüntü içinde kendini nereye yerleştireceğini nasıl "bilir"? Neden her foton aynı yoldan gidip öteki taraftaki aynı noktaya düşmez?

Bunlar gizemli de olsa neticede ışığın zaten tuhaf bir şey olduğunu ileri sürebilirsiniz. Gerçekten de öyledir. Işık (daha doğrusu elektromanyetik ışıma) daima aynı hızda yol alır, yani ışık hızıyla (*c* ile gösterilir). Siz nasıl hareket ederseniz edin, ışık kaynağı nasıl hareket ederse etsin ışık hızını ölçtüğünüzde hep aynı sonucu elde edersiniz. Görelilik kuramını ele alırken de göreceğiniz gibi bunun derin içerimleri var; gündelik hayattaki hiçbir şeyin davranışına benzemediği kesin. Ayrıca fotonların kütlesi de yok, işte sağduyuya ters, acayip bir durum daha. Belki de iki delik düzeneğinden geçen fotonların tuhaf davranışı ağırlıksız olmaları ve ışık hızıyla yol almaları yüzündendir? Ya da belki ışığın kabarık siciline eklenecek başka bir tuhaf özelliğidir bu da. Ralph Baierlein'in söylediği gibi, "Işık dalga olarak yol alır fakat yola bir parçacık olarak çıkar ve hedefe parçacık olarak varır".[2] İşte belki de böyle bir şeydir, ışığın özel niteliklerinden biridir, değil mi?

2. Baierlein, *Newton to Einstein*, s. 170.

Ne yazık ki durum bu değil. Bu numaranın tamamen aynısını elektronlarla da yapabilirsiniz – elektron tam olarak gündelik hayatta ele avuca gelmesine alışık olduğumuz türden bir parçacık değilse de, bir kütleye sahip olduğu gibi elektrik yükü de var ve şartlara bağlı olmak üzere değişik hızlarda hareket edecek kadar da edepli. Ne var ki, elektronlar da dalga halinde yol alıp parçacık olarak yola çıkar ve hedefe varır. İşte bu yüzden meseleyi olur böyle şeyler diyerek geçiştiremeyiz.

Elektronik Girişim

Elektronlar parçacık dünyasının çok bir içindedir. Parçacık oldukları ilk defa 1897'de Cambridge'deki Cavendish Laboratuvarı'nda çalışan J. J. Thomson tarafından tespit edilmiştir. Thomson elektronların atomlardan kaçan ya da kopan parçacıklar olduğunu göstermiştir – atomların bölünmez olmadığının ilk kanıtı. Her elektronun kütlesi tamamen aynıdır (9×10^{-31} kg'dan biraz daha fazla, yani "sıfır nokta 30 sıfır ve bir 9" kg). Her elektron aynı elektrik yüküne (1.6×10^{-19} kulomb) sahiptir. Elektrik ve manyetik alanlar kullanılarak istenilen şekilde yönlendirilebilir ve itilip çekildikleri şekle bağlı olarak daha hızlı ya da daha yavaş hareket edebilirler. Elektronlar pek çok açıdan minik, elektrik yüklü mermiler gibi davranırlar.

Ve fakat, 1920'lerin sonlarında, elektronların keşfinden 30 yıl sonra elektronların aynı zamanda dalga gibi davrandıkları açıklık kazanmıştı. 1927'de bunu ispatlamış insanlardan biri J.J. Thomson'ın oğlu George Thomson'dı. Elektronun dalga-parçacık ikiliği denilen iki yanlı doğası 1980'lerin ortalarına gelinmeden çok önce net olarak ortaya konmuştu. Fakat iki delik deneyinin elektronlar kullanılarak gerçekten uygulanması ancak 1987'de bir Japon ekibi tarafından mümkün olmuştur.

O tarihten önce ders kitapları (Feynman'ınkiler dahil) ve popüler bilim kitapları (benimkiler de dahil) böyle deneyleri tarif etmişlerdi. Okura büyük bir güvenle, bunlar sadece "düşünce deneyleri" ama elektronlar hakkında bütün bilinenlere dayanarak, duvarda iki minik delikle karşılaştıklarında nasıl davranacaklarını söylemek mümkün, diyorlardı. Ne var ki, elektronların parçacık olarak tespit

edilmelerinden ancak 90, dalga olarak tespit edilmelerindense 60 yıl sonra Hitachi araştırma laboratuvarlarından ve Tokyo'daki Gakushuin Üniversitesi'nden bir ekip çift yarık deneyini elektronlarla bilfiil yapmıştır.

Deneylerindeki "çift yarık", elektron çift prizması denilen aygıtla elde edildi. Öteki tarafta elektronların konacağı perde de aslında bir TV ekranıydı. Her elektronun gelişi bu perdede kalıcı bir ışık noktası oluşturuyordu. Böylece peş peşe gelen elektronlarla perdede bir örüntü oluştu.

Deneyin sonuçları, fotonlarla yapılan eşdeğer deneyin sonuçlarıyla tamamen aynıydı. Elektron kaynağı, standart, iyi bilinen bir aygıt olan elektron mikroskopunun ucuydu. Elektronlar, elektron "tabancası"nın ağzından parçacık olarak çıktı; öteki yandaki perdeye her biri tek bir ışık noktası oluşturan parçacıklar olarak vardı. Fakat perdede bunların birikimiyle oluşan örüntü girişim örüntüsüydü. Bu da elektronların deliklerden dalga olarak geçtiğini gösteriyordu.

Elektronların bu garip davranışını da çok dert etmeyebilirsiniz. Ne de olsa tek bir elektronu elinizde tutamazsınız. Elektronu görmüş olan kimse yok, sadece uygun hassasiyetteki perdelere çarpınca yarattığı noktaları görüyoruz. Hem gündelik hayattaki tecrübelerimizden biliyoruz ki bu tuhaf girişim etkileri deliklerden taş attığımız zaman meydana gelmiyor. Ne taşlar, ne beyzbol topları ne de gündelik hayattaki başka bir şey bu garip dalga-parçacık ikiliğini gösteriyor.

Evet ama fizikçilerin buna da verecek bir cevapları var. Eğer gözle görülecek kadar büyük parçacıkların da iki delik düzeneğinden geçerken dalga gibi davrandıklarının ispatını istiyorsanız, o da var.

Söz konusu parçacıklar atomlar. Kuşkusuz atomları da kendi gözlerinizle göremezsiniz ya da tek bir atomu avucunuzun içinde tutamazsınız. Fakat manyetik alanlar içinde tutulmuş atomların tek tek fotoğrafları çekilebiliyor. Örneğin Hans von Baeyer'in *Taming the Atom*'da (Hırçın Atom) anlattığı bu başarı, atom kavramı bilim insanları tarafından tamamen ancak 20. yüzyılın başlarında kabul gördüğü için daha da önemli. Hatta Albert Einstein doktora derecesini, başka şeylerin yanı sıra, atomların gerçekliğini ortaya koyan çalışmasıyla almıştı. Atomlar elektronlardan çok daha büyük olsa-

lar da gündelik hayat standartlarına göre hâlâ minik sayılı neğin bir karbon atomun ağırlığı 2×10^{-26} kg'ın hemen altındadır, yani elektronun kütlesinin 22 bin katı. Atomun büyüklüğü yaklaşık bir milimetrenin on milyonda biri kadardır. Bu da, posta pulunun kenarındaki tek bir tırtığın kalınlığına on milyon atom sığar demektir. Fakat atomların tek olarak fotoğrafı çekilmiştir ve de bu resimler TV ekranında "gerçek zamanlı" olarak bile gösterilebilir.

İki delik deneyi atomlarla ancak 1990'ların başında yapılmıştır. Almanya'daki Konstanz Üniversitesi'nden bir ekip arkaya bir detektör koyarak altın folyodaki 1 mikrometre (metrenin milyonda biri) genişliğindeki yarıklardan helyum atomlarını geçirmiştir. Bu sefer girişim örüntüsünün oluşması doğrudan TV ekranında gösterilememiş, fakat detektör "perdesi"nin farklı yerlerine ulaşan helyum atomu sayısının ölçümleri artık tanıdık olan örüntüyü vermiştir. Yani, atomlar da dalga olarak yol alıp gittikleri yere parçacık olarak varıyorlar.

1990'ların başında başka birkaç araştırma grubu da benzer sonuçlar duyurdu. Bir tanesinde, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde, bir sodyum atomu ışını kullanıldı. Bütün bu deneylerde sonuçlar aynıydı. İki delik düzeneğinden geçen tek bir atom aynı anda iki yerden geçiyor ve kendisiyle girişime uğruyor. Görünüşe göre atom aynı zamanda iki ayrı yerde (iki delikte birden) bulunabiliyor.

Aynı tema üzerinde (şimdilik) son bir yenilik olarak, Colorado, Boulder'daki Amerikan Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü'nde ve Teksas Üniversitesi'nde çalışan araştırmacılar 1993'te böyle bir deneyi tersine çevirdiklerini bildirdiler. İki delik düzeneğinden atom geçirmek yerine bir manyetik alan içinde atom çiftlerini kıstırdılar ve atomları fiilen "delikler" yerine kullanıp üzerlerinden ışık sıçratarak ortaya çıkan girişim örüntüsünü ölçtüler. Atomlardan sıçrayan dalgalar iki delik deneyindeki yayılan dalgalarla aynı şekilde yayıldılar. Elbette bu yeni deney atomların parçacık olması ve manyetik alan içinde kıstırılarak dağıtma işini yapabilmesi sayesinde mümkün oluyor. Dalga-parçacık ikiliğinin, atomları –fotoğrafı çekilecek kadar büyük parçacıklar olduklarını unutmayalım– ve girişimi içeren bu tür deney kombinasyonlarından daha net bir örneği yok.

Bu garip etkiler taş ya da beyzbol topu veya elle tutulur gözle görülür başka bir şey için kendini göstermediğinden, kuantum dün-

yası kurallarının işlemesinin durduğu bir seviye olsa gerek. Atomla insan arasındaki boyut yelpazesinde bir yerde kuantum kuralları saf dışı kalıyor ve klasik fizik kuralları devreye giriyor. Bu seviyenin neresi olduğu ve bu devralmanın neden meydana geldiği bu kitapta daha sonra ele alınacak konular. Cevaplar bizim gerçeklik kavramımızı sarsıyor.

Fakat şimdi tekrar tekrar vurgulanması gereken önemli nokta bütün bu deneylerin artık yapılmış olması. Sonuçlar fizikçileri şaşırtmadı. 1930'dan bu yana yetkin her fizikçi kuantum kuramını kullanarak deneylerin nasıl sonuçlanacağını tahmin edebilirdi. Elbette deneyler farklı sonuçlana*bilirdi* – kuantum kuramı yanlış *olabilirdi*. Fakat olmadı. Ta derinlerinde, gizemin kalbinde, 1980'lerin sonlarıyla 1990'ların başlarında kilit önemdeki deneyler yapılınca kuantum fiziğiyle tamamen aynı çizgide "cevaplar" buldular. Peki kuantum fiziği bu tuhaf davranışı nasıl açıklıyor?

Standart Görüş

Kuantum dünyasında olup bitenlerin standart yorumu Kopenhag Yorumu diye bilinir, çünkü büyük ölçüde, Kopenhag'da çalışan Danimarkalı fizikçi Niels Bohr tarafından geliştirilmiştir. Başta Alman Werner Heisenberg ve Max Born olmak üzere başka insanlar da Kopenhag Yorumu'na dönüşen fikir paketine önemli katkılarda bulunmuştur, fakat Bohr daima bu yorumun en ateşli savunucusu olmuştur. 1930'a gelindiğinde, yani bir insan ömründen daha kısa bir süre önce, paket temel olarak tamamlanmıştı. O zamandan beri de kuantum dünyasını içeren hemen her uygulama çalışmasının temelini oluşturmuştur, üniversite ve fakültelerdeki hırslı fizikçilere öğretilen hikâye budur. Fakat söz konusu paket bazı oldukça acayip kavramlara dayanmaktadır.

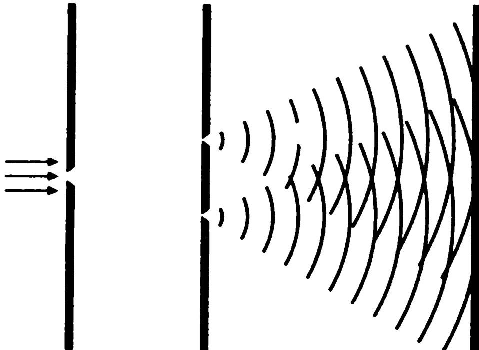
Anahtar kavram "dalga fonksiyonunun çöküşü" denilen şeydir. Foton ya da elektron gibi bir varlığın "dalga olarak yol alıp gittiği yere parçacık olarak varması"nı açıklamaya çalışırken Bohr ve çalışma arkadaşları, dalgayı "çökertip" parçacık yapan şeyin dalgayı seyretme eylemi olduğunu söylediler. Bunu iki delik deneyinin elektron versiyonunda iş başında görebiliriz – elektronlar düzenekten

dalga olarak geçer, sonra da "çökerek" detektör perdesinde tek bir noktaya dönüşür.

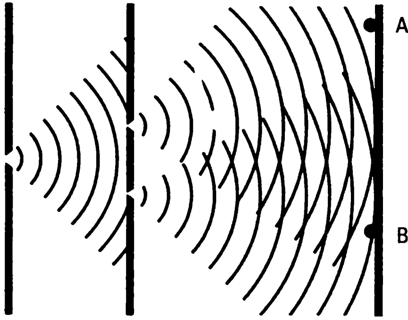
Ama bu, hikâyenin sadece bir kısmı. Tek bir elektronun dalgası nasıl kendisiyle girişim yapabilir ve perdede hangi noktada çökeceğini nasıl seçer? Kopenhag Yorumu'na göre bunun nedeni düzenekten gerçekten geçen şeyin kesinlikle fiziksel bir dalga değil, bir olasılık dalgası olmasıdır. Kuantum dalgasının nasıl hareket ettiğini tanımlayan denklem –Avusturyalı Erwin Schrödinger'in bulduğu dalga denklemi– gölcükteki dalgacıklar gibi fiziksel bir dalgayı tanımlamıyor. Aslında fotonun (ya da elektronun ya da her ne ise) belli bir yerde bulunma olasılığını tanımlıyor.

Büyük ölçüde Born'un çalışmalarından kotarılan bu tabloda, gözlemlenmeyen bir elektron gerçekten de parçacık formunda mevcut değildir. Elektronu falanca noktada bulmanızın belli bir olasılığı, filanca noktada bulmanızın başka bir olasılığı vardır, fakat ilke olarak evrendeki herhangi bir yerde boy gösterebilir. Bazı yerler çok olasıdır –iki delik deneyindeki parlak şeritler– ve bazı yerler son derece zayıf bir olasılıktır – karanlık şeritler. Fakat elektronun girişim örüntüsü yerine Mars'ta ya da yan komşunuzun TV cihazında bulunması çok zayıf bir ihtimal de olsa gerçekten *mümkündür*.

Ne var ki, elektron gözlemlenince olasılık değişir. Dalga fonksiyonu çöker (belki Mars'ta, eğer birisi orada bakıyorsa, ya da da-



5 Şekil 4'ün (s. 24) ortaya koyduğu muammanın standart açıklaması "olasılık dalgaları" nın iki delikten de geçip ışın demetindeki her bir parçacığın nereye konacağına karar verdiği yönündedir. Olasılık dalgaları tıpkı su dalgaları gibi girişimde bulunur.



6 Fakat parçacık *aradığımız* zaman parçacık buluyoruz (bu örnekte A ve B)! Olasılık dalgaları parçacıkların nerede olduklarına karar veriyor, ama dalgaları hiç görmüyoruz. Düzenekten geçip gidenin gerçekten ne olduğunu bilmiyoruz. Bu garip davranış elektronun (ya da fotonun) "dalga olarak yol aldığı, ama parçacık olarak vardığı" tabirine vesile olmuştur.

ha büyük ihtimalle girişim örüntüsünde), işte o noktada elektronun nerede olduğu yüzde 100 kesindir. Fakat bakmayı bırakır bırakmaz olasılık o noktadan dışarı doğru sızmaya başlar. Elektronu son baktığınız yerde bulma olasılığınız düşer ve olasılık dalgası evrende yayılırken elektronu başka bir yerde bulma olasılığınız artar.

Garip de görünse uygulamada çok faydalı bir kavramdır bu, çünkü TV cihazı ve bilgisayar çipi yapmak gibi uygulamaların tümünde çok büyük sayıda elektronlarla uğraşıyoruz. Eğer hepsi olasılık ve istatistiğin katı kurallarına uyarlarsa o zaman elektron yığınının davranışı önceden bilinebilir. Bir bilgisayar devresinde elektronların yüzde 30'unun bir yerden, yüzde 70'in başka bir yerden gideceğini bilirsek, elektronların tek tek hangi yoldan gittiğini dert etmeyiz. Aynı şekilde kumarhane sahipleri arada bir oyuncu rulette yüklü bir miktar kazansa da olasılık kurallarının onlara uzun vadede kârı garanti edeceğini bilir. Fakat Albert Einstein bu fikirden öyle nefret etmişti ki, "Tanrının evrenle zar attığına inanamam" şeklindeki o ünlü sözünü söylemişti. Tek elektron ya da tek fotonla yapılan deneylere geçtiğimizde içerimler kendini apaçık ortaya koyuyor.

Bunlardan biri iki delik deneyini bir kere daha düşününce görülebilir. Deneyin bu versiyonu henüz tek elektronlarla yapılmamıştır, fakat biraz daha karmaşık deneyler elektronların nasıl davrandı-

ğını doğrulamıştır. Deneyi bu arı haliyle gerçekleştirebilseniz meydana gelecek şeyin aynı olduğuna şüphe yok.

Önce, bir delik kapalıyken girişim örüntüsüne (ister ışıkla, ister elektronla yaratılmış olsun) ne olduğunu hatırlayın. Örüntü kaybolur. Belli ki sadece tek delik açıkken elektronlar detektör perdesine ulaşmak için sadece ve sadece o delikten geçmek zorundadır. Ama elektronları sadece parçacık olarak düşünürseniz, bu zaten başlı başına garip bir şeydir. Tek delikten geçen elektron diğer deliğin açık olup olmadığını nasıl "bilir"? İki delik düzeneğinin bir deliğinden geçen basit bir parçacık diğer deliğin açık olup olmadığını ne bilir ne de dert eder. Fakat düzeneği her bir elektron "tabanca"dan ayrılırken ikinci delik kapalı (ya da açık) olacak şekilde ayarlasanız ve elektron ilk deliğe ulaşmadan açsanız (ya da kapasanız) bile, elektron doğru türde bir toplam örüntü meydana getirmek için hedef perdeye doğru uygun güzergâhı "seçecektir". Hatta deneyi ikinci deliği rasgele açıp kapayacak şekilde de düzenleyebilirsiniz. Her bir elektron öteki deliğin *o anda* açık olup olmadığına göre deliklerden birine yönelik bir yol seçecektir.

Görünüşe bakılırsa elektronlar yanı başlarındaki dünyadan daha fazlasının farkındalar. Sadece tek bir delikteki şartların değil, bütün deney düzeneğinin farkındalar. Bu yerbilmezlik kuantum mekaniğinin temel bir parçasıdır ve Einstein'ı derin kaygılara sevk etmiştir; "hayalet işi uzaktan etki" sözünü bu duruma atfen söylemiştir, gerçi Einstein bu sözü söylediğinde yerbilmezliğin birazdan açıklayacağım daha garip bir tezahürünü düşünüyordu.

Ne var ki şu ana kadar bütün delilller türlü açık-kapalı delik kombinasyonlarını denerken detektör perdesinde oluşan örüntünün gözlemlenmesinden gelmiştir. Neden deliklerin kendisinde neler olduğuna bakmıyoruz? Deneydeki iki deliğin yanına birer detektör yerleştirelim ve elektronları teker teker gönderelim. Şimdi elektronun iki delikten birden dalga olarak geçip geçmediğini ya da sadece tek bir delikten geçip geçmediğini (hatta her bir delikten yarım elektronun geçip geçmediğini) görmek için bakabiliriz. Ayrıca düzenekten bir sürü elektron geçtikten sonra bir gözünüz de ne tür bir örüntü oluşuyor diye detektör perdesinde olabilir. Böyle bir durumda her elektronun daima parçacık olduğunu, ya bir delikten ya da ötekinden geçtiğini görürsünüz. Elektron küçük bir mermi gibi davra-

nır. Ve de, şu işe bakın ki, girişim örüntüsü ortadan kaybolur. Perdedeki örüntü her bir delikten tek başına geçen küçük mermilerin (ya da duvardaki iki deliğe atılan taşların) yarattığı örüntüyle aynı olur. Elektron dalgasının gözlemlenmesi eylemi bu dalgayı çökertir ve delikten geçtiği o kritik anda parçacık gibi davranmasını sağlar. Tabii yerbilmezlik muammasından kurtulduğumuzu sanmayın. Aslında örüntünün değişmesi için deliklerden birine bakmamız yeterli. Bakarsak sadece içinden geçen mermivari elektronları ve perdede de parçacıklara özgü örüntüyü görürüz. Bir şekilde, ikinci delikten geçen elektronlar bizim öteki deliğe baktığımızı "bilir" ve bu yüzden onlar da parçacık gibi davranır.

Kopenhag Yorumu'nun olasılık yönü hâlâ işin içinde. Deneyin kusursuz bir simetri içinde hazırlandığını varsayarsak elektronların tam olarak yarısı olası güzergâhı takip eder. Yüzde 50'si bir delikten, yüzde 50'si öteki delikten geçer. Her bir atomun hangi delikten geçeceğini, dolayısıyla da detektör perdesinde hangi lekeyi bırakacağını önceden bilmenin hiçbir yolu yok. Tıpkı yazı tura atıp arka arkaya tura gelmesi gibi tesadüfen birkaç elektron arka arkaya aynı delikten geçebilir. Fakat gözlemlenen bir milyon elektron iki delikten geçtikten sonra yarım milyonu perdedeki bir leke kümesinde, yarım milyonu öteki leke kümesinde olacaktır. Olasılık dalgası hâlâ iş başındadır, elektronları seyretseniz ve parçacık olarak davrandıklarını bilseniz bile.

Bohr, önemli olanın tek bir elektronun, hatta bir milyon elektronun davranışı olmadığını ileri sürüyordu. Önemli olan elektronları, iki deliği, detektör perdesi *ve insan gözlemcisiyle* bütün deney düzeneğidir. Bir elektron için "dalgadır" ya da "parçacıktır" demek imkânsızdır. Söylenebilecek tek şey şudur: Eğer bir deney belli bir şekilde kurulmuşsa ve belli ölçümler yapılmışsa, o zaman belli sonuçlar elde edersiniz. Deneyi dalgaları ölçmek için kurarsanız girişim örüntüsü elde edersiniz; deneyi deliklerden geçen parçacıkları izlemek için kurarsanız deliklerden geçen parçacıklar görürsünüz. Hatta iki delikteki detektörleri açıp açmamaya ve parçacıklara bakmaya elektronların "tabanca"dan çıkmalarından sonra karar verebilirsiniz; her halukârda nihai sonuç (perdedeki örüntü) bütün deney düzeneğine bağlıdır. Kuantum dünyasının bu bütünsel açıklaması bizi çok derin felsefi sulara götürür.

Derin Sular

Kopenhag Yorumu 1930'dan ta 1980'lere kadar 50 yılı aşkın süredir fizikçilerin büyük bir çoğunluğu tarafından neredeyse hiç itiraza uğramadan hüküm sürmüştür. Deneylerin sonuçlarını tahmin etmede işe yarayan bir araç olduğu sürece Kopenhag Yorumu'yla iç içe olan bu derin felsefi bulmacalar bu fizikçilerin umurlarında değildi – hatta çoğunun hâlâ umurunda değil. Fakat son yıllarda kuantum kuramının "ne anlama geldiği" konusunda gittikçe artan bir rahatsızlık var, alternatif yorumlar bulmak için gitgide daha çok gayret sarf edilmeye başlandı.

Asıl sorun şu dalga fonksiyonunun çöküşü meselesi. Bohr'un bütün deney düzeneğinin dikkate alınması gerektiğine ve dalgaların çöküş şeklinin bütün deney düzeneğinin kurulumuna bağlı olduğuna ilişkin sözleri iyi hoş da; arı duru, müstakil deney diye de bir şey yok ki. Bu kuantum yorumunun bize söylediğine göre elektron gibi varlıklar sadece gözlemlendikleri zaman gerçektirler; yani bir anlamda ölçüm aleti fotonlardan, elektronlardan ve diğer her şeyden "daha gerçek"tir. Benim Kopenhag Yorumu hakkındaki yorumum bu değil; bu Bohr ve Heisenberg'le onların çalışma arkadaşlarının açıkça ifade ettikleri şey. Mesela Heisenberg şöyle demiştir: "Kopenhag Yorumu klasik kavramlarla, yani gerçekle tarif edilebilen şeyleri ve işlemleri fiziksel yorumların temeli olarak alır."[3] Başka bir deyişle, klasik dünyada her şeyin temel taşı olan atomlar bir şekilde atomların oluşturduğu şeylerden daha az gerçekler! 1930'larda bile bu pek çok insana düpedüz tuhaf gelmiştir; artık atomların resmi de çekildiğine göre inanması daha da güç.

Bu tarz akıl yürütmeyi –Kopenhag Yorumu'nu– iki delik deneyine uygulayınca deneyi tek bir hale indirgemek için birisinin deneye bakması gerekiyor. O sıralarda (1981) New York Bilimler Akademisi başkanı olan ve hiç şüphesiz kuantum kuramının ne olduğunu gayet iyi bilen Heinz Pagels'ın sözleriyle: "Uzayda belli bir nok-

3. Aktaran Nick Herbert, *The New Physics*, Paul Davies (haz.), Cambridge University Press, 1989, s. 143.

tada, örneğin iki delikten birinde fiili gözlemden bağımsız olarak bulunan bir elektronun nesnel varlığının hiçbir anlamı yoktur. Görünüşe göre elektron sadece ve sadece biz onu gözlemlediğimiz zaman gerçek bir nesne olarak birden var oluyor!"[4] Fakat deneyci sadece deneyin bir parçası değil aynı zamanda dış dünyanın da bir parçasıdır. İnsanlar, başka şeylerin yanı sıra elektronlardan meydana gelir; bu elektronların dalga fonksiyonlarını çökertip deneycinin bedeninde yerleşmiş nesneler olarak davranmalarını sağlayan nedir? Herhalde gözlemcinin dışındaki dünyayla olan etkileşim. Peki gözlemcinin dışındaki dünyayı bu anlamda "gerçek" kılan nedir? Gittikçe daha büyük ölçeklerde daha başka şeylerle (ve gözlemlercilerle) olan başka etkileşimler. Kopenhag Yorumu'nu harfiyen alırsanız size söylediği şudur: Elektron dalgası tüm evren ona baktığı için çökerek detektör perdesinde bir nokta oluşturur. Bu yeterince garip; fakat bazı evrenbilimciler (Stephen Hawking de dahil) buradan, "Evrenin dışında" evrene bir bütün olarak bakıp tüm dalga fonksiyonunu çökerten başka bir şeyin olması gerektiği anlamının çıkacağından endişe ediyorlar.[5] Bundan farklı olarak John Wheeler sadece bizler gibi bilinçli gözlemcilerin varlığının dalga fonksiyonunu çökertip Evreni var ettiğini iler sürdü. Bu tabloya göre evrendeki her şey sadece *biz* ona bakıyoruz diye var. Böyle umutsuz çözüm önerileri ve çaresizlikten doğan açıklamaları sonra daha yakından ele alacağım; fakat böyle iddiaların saygın bilim insanları tarafından ileri sürülmüş olması ne kadar derin sularda olduğumuzu göstermeye yeter.

Başka bir sorun da bir kuantum varlığının davranışının parçacık ve dalga yönleri arasındaki ilişkiyle ilgili. Bohr bunları tamamlayıcı özellikler olarak tarif etmiştir, tıpkı madeni paradaki yazı ve turanın birbirini tamamlayıcı olması gibi. Eğer bir madeni parayı masaya düz koyarsanız ya tura yukarıda olacaktır ya da yazı, fakat ikisi aynı anda yukarıda olamaz. Kopenhag Yorumu'na göre elektron gibi bir varlık ne dalgadır ne de parçacık, farklı bir şeydir, gündelik dille açıklayamayacağımız bir şeydir. Fakat hangi ölçümleri ya-

4. Pagels, *The Cosmic Code*, s. 144.

5. Örneğin Hawking'in kitabı *Zamanın Kısa Tarihi* ya da benim kitabım *In Search of the Big Bang.*

pacağımıza –kuantum madeni parasının hangi yüzünü yukarı koyacağımıza– bağlı olarak bize ya dalga yüzünü gösterir ya da parçacık yüzünü. Aslında ölçmeye zekâmızın yetmediği ve hakkında hiçbir şey bilmediğimiz başka özellikleri de olabilir.

Bu tamamlayıcılık ya da dalga-parçacık ikiliği Heisenberg'in keşfettiği ünlü belirsizlik ilkesiyle ilgilidir. Bu ilkenin en basit versiyonu bir kuantum nesnesinin aynı anda hem konumunu hem de momentumunu ölçmenin imkânsız olduğunu söyler. Momentum böyle bir nesnenin nereye ve ne hızla gittiğinin ölçümüdür basitçe. Bu pek çok açıdan bir dalga özelliğidir – dalgaların bir yerlere doğru hareket ediyor olması gerekir, yoksa dalga olmazlardı. Konum kesin bir parçacık özelliğidir – dalga doğası gereği dışa yayılır, oysa parçacık tek bir yerde hapsolmuştur. Elektronun konumunu gözlemleyen ölçümler ya da bize hangi tarafa gittiğini söyleyen ölçümler yapabilir, iki durumda da ölçümleri istediğimiz kadar hassas kılabiliriz. Fakat konumu çok doğru hesaplamaya çalışmak elektronun momentumunu önemli ölçüde bulanıklaştırır ve momentumu çok doğru ölçerseniz bu sefer de konum bulanıklaşır.

Ne var ki bu, bazı ders kitaplarının hâlâ yanlış şekilde öne sürdüğü gibi sadece ölçüm yapmanın uygulamadaki güçlüklerinden kaynaklanmıyor. Sebep elektronun konumunu ölçerken ona bir tekme atıp (belki üstünden bir foton sektirerek) momentumunun değişmesine yol açmamız değil. Bir kuantum nesnesi kesin olarak tanımlı bir momentuma ve kesin olarak tanımlı bir konuma *sahip değildir*. Elektronun kendisi belli sınırlar içinde nerede olduğunu ya da nereye gittiğini "bilmez". Birazcık abartırsak, tam olarak nerede olduğunu bilirse nereye gittiğini bilmez; tam olarak nereye gittiğini bilmesi halindeyse nerede olduğu hakkında en ufak bir fikri yoktur. Ama genellikle bir kuantum nesnesinin hem nerede olduğu hem de nereye gittiği hakkında yaklaşık bir fikri vardır. Fakat buradaki önemli kelime "yaklaşık"tır; gündelik hayattaki "sağduyulu" bir bakış açısıyla anlamak zor da olsa, kuantum varlığı belli bir yere sabitlenemez ve nereye gittiği hakkında her zaman bir belirsizlik vardır.

Örneğin kuantum belirsizliğinin, klasik fiziğe göre birbirlerine dokunacak kadar yakın olmayan atom çekirdeklerinin üst üste binip birleşmelerine izin verdiği nükleer füzyon tepkimelerinde bu son derece önemlidir. Yıldızları sıcak tutan şey bu nükleer tepkime-

lerin bazılarıdır. Kuantum belirsizliği olmaksızın güneş şimdi parladığı gibi parlamazdı.[6]

Bunlar uzlaşılması zor fikirler, ama size bu fikirlerin nasıl gelişip bu hale geldiğinin tarihini ya da kuantum dünyasının gerçekten de böyle işlediğinin kanıtını aktarmayacağım. Benim kitaplarım da dahil pek çok başka kitap bu ayrıntıları kapsıyor. Ben bu kitapta daha çok Kopenhag Yorumu'nun nerede iflas ettiğini ve yerine neyin geçebileceğini ele alacağım. Belirsizlik kuantum seviyesinde gerçekten hayatın bir olgusu gibi görünse de, dalga-parçacık ikiliğini gündelik hayatta niye göremiyorsak o da aynı sebepten gündelik hayatta kendisini göstermez. Bu fenomenleri tanımlayan denklemler kuantum öncüsü Max Planck'ın adına istinaden Planck sabiti adı verilen bir sayı içerir. Planck sabiti, gündelik hayattaki nesneler için geçerli olan kütle ve momentumlara göre çok miniktir. Değeri tam 6.55×10^{-27} erg/sn'dir (birimleri dert etmeyin; önemli olan kütlelerin eşdeğer birimle, yani gram cinsinden ölçülmesi). Kuantum etkileri sadece aynı yaklaşık değerlerde kütlesi olan nesneler için geçerlidir – 9×10^{-31} kg kütlesi olan elektron gibi (erg/sn ile daha rahat karşılaştırabilir birim olsun diye 9×10^{-28} gr diyebiliriz). Atomların kütlesinden daha büyük kütlelerle uğraşırken kuantum etkileri o kadar küçüktür ki yapacakları etkiler göz ardı edilebilir – tabii atomdan büyük her şeyin atomlardan yapılmış olduğunu *unutmayalım.*

Burada bir soluklanıp kuantum dünyasının gündelik hayattaki tecrübelerimizin ne kadar uzağında olduğunu hissetmeye çalışmakta yarar var. 10^{-27} demek, bir milyarda birin milyarda birinin milyarda biri demektir. Çapı 10^{-27} cm olan bir nesneden milyar kere milyar kere milyar tanesi yan yana gelse 1 cm'lik mesafeyi doldururdu. Peki her biri 1 cm uzunluğundaki milyar kere milyar kere milyar nesneyi –diyelim ki küp şeker– yan yana koysak ne kadarlık bir mesafeyi kat ederdik? Bunun cevabı 10^{27} cm. Peki bu ne kadar bir büyüklüktür? Astronomide standart uzunluk ölçü birimi, ışığın bir yılda kat edeceği mesafe (bir ışık yılı) yaklaşık 10^{18} cm'dir; demek ki 10^{27} küp şeker yan yana konulduğunda bir milyar (10^9) ışık yılı uzunluğuna erişecektir. Evrende bilinen en uzak nesneler, bazı kuasarlar, yaklaşık 10 milyar ışık yılı uzaktalar. Demek ki 10^{27} küp

6. Bkz. *Blinded by the Light* adlı kitabım.

şeker bilinen en uzak kuasara olan mesafenin onda biri kadar uzanacakmış. Çok yuvarlak bir hesapla, küp şekerin bütün gözlemlenebilen evrene olan oranını düşündüğünüzde, kuantum dünyası buradaki küp şekerden çok daha küçük ölçeklerde işler. Başka bir deyişle, insan kuantum dünyası ile bütün evren arasındaki bu logaritmik ölçekte, büyüklük olarak ortalarda bir yerdedir – ve biz her iki uçta neler olup bittiğini bildiğimizi iddia ediyoruz.

Dalga-parçacık ikiliğinin bir tuğlada ya da evde veya bir kişide karşımıza çıkmasını beklemiyoruz çünkü bunlar Planck sabitiyle kıyaslandığında çok büyük kalırlar. Kopenhag Yorumu'nun önemli özelliklerinden birine göre her iki niteliği aynı anda göremeseniz de, fizikçiler artık dalga-parçacık ikiliğini kuantum nesnelerinde görmeyi umuyorlar. Bohr bu konuda gayet açıktı. İlke olarak foton ya da elektron gibi bir varlığın dalgavari özellikleriyle parçacıkvari özelliklerinin aynı anda görülmesinin imkânsız olduğunu iddia ediyordu. Bohr ve Kopenhag Yorumu için bahtsız bir durum ama, daha sonra da göreceğimiz gibi, deneyciler bu iddiayı bile çürütmeye çalışıyorlar.

Buradaki önemli nokta şu: Kopenhag Yorumu fizikçilerin deney sonuçlarını tahmin etmelerine yarayan ve belirsizlik, dalga fonksiyonun çöküşü, olasılık, gözlemcinin rolü ve deneylerin bütünselliği gibi konuları kapsayan bir dizi formül sunduğu için işe yarıyor. Fakat herhangi bir şeyi *açıklamıyor*. Bunun farkına yeni varılmış değil. Einstein Kopenhag Yorumu'nun kusurlarını ve saçmalığını göstermek için hayatının on yılını Bohr'la yaptığı yazışmalarda dostane bir tavırla savaşarak geçirdi. En iyi bilinen kuantum saçmalığı örneğini de, bütün bu fikir paketinin çok gülünç olduğuna ve bu yüzden bırakılması gerektiğine meslektaşlarını ikna etmek amacıyla Schrödinger geliştirdi. Tabii burada şu ünlü kutudaki kedi "düşünce deneyi"nden söz ediyorum. Gayet aşina olmasına rağmen (kedi 1995'te 60 yaşındaydı), kuantum kuramının her gelişmiş yorumunun –olan biteni gerçekten *açıklayan* bir yorum– aydınlatması gereken güçlüklere örnek olması bakımından bu deneyi özetlemekte yarar var.

Kutudaki Kedi

Kopenhag Yorumu'nun, kutudaki kedi "deneyi"yle apaçık ortaya çıkan en garip özelliklerinden biri bilinçli bir gözlemcinin mikrodünyada neler olacağını belirlemedeki rolüdür. Bunun en basit örneği, içerisinde tek bir elektron olan bir kutu düşünmektir. Kimse kutunun içine bakmazsa Kopenhag Yorumu'na göre elektronu kutunun herhangi bir yerinde bulma olasılığı eşittir – elektronla özdeşleşmiş olasılık dalgası kutuyu homojen şekilde doldurur. Şimdi de hâlâ kutunun içine kimse bakmazken kutunun ortasından otomatik olarak bir perdenin aşağı indiğini ve kutuyu iki eşit bölüme ayırdığını düşünün. Sağduyuya göre elektron kutunun ya bir bölümünde ya da öteki bölümünde olmalıdır. Fakat Kopenhag Yorumu bize olasılık dalgasının hâlâ iki yarım kutu içinde eşit olarak dağıldığını söyler. Yani elektronu kutunun bir yarısında ya da öteki yarısında bulma şansı hâlâ yarı yarıyadır. Dalga ancak, birisi yarım kutulara bakıp elektronun hangi tarafta olduğunu fark edince çöker ve elektron "gerçek" olur. O anda bölmenin öteki tarafındaki olasılık dalgası ortadan kaybolur. Eğer kutuyu tekrar kapatıp elektrona bakmayı bırakırsanız olasılık dalgası elektronun tespit edildiği yarım kutuyu dolduracak şekilde dağılmaya devam edecek fakat öteki yarım kutu içinde tekrar yayılmayacaktır.[7]

Fizikçi Paul Davies durumu gayet özlü biçimde ifade etmiştir: "Gözlem öncesinde her iki odacıkta adeta birisinin 'gerçek' bir atoma dönüştürülmesi ve aynı anda ötekinin tamamen ortadan kalkması için gözlenmeyi bekleyen iki bulanık elektron 'hayaleti' vardır."[8] "Aynı anda" kelimesi de burada önemlidir, yerbilmezliğin iş başında olduğunu gösteren başka bir örnektir. Fakat bunun neleri ima ettiğine geçmeden önce, elektronun yarım kutulardan birinde ya da ötekindeki varlığının gerçekliğinden gözlemcinin sorumlu

7. En azından aynı eşit olasılıkla değil; elektronun öteki yarım kutuda ya da tümden kutunun dışında olma olasılığı düşük (*çok* düşük) de olsa vardır, fakat bu örnek için ihmal edilebilir.

8. Davies ve Brown, *The Ghost in the Atom*, s. 22.

olduğu iddiasının saçmalığını Schrödinger'in nasıl ortaya koyduğunu açıklamak istiyorum.

Schrödinger'in bulmacası ilk olarak 1935'te gazetede çıktı. İki sonucun da tam olarak yüzde 50 şansı olduğu bir kuantum durumunu kurmaya dayalı bir deneydi bu. İlk örneğinde radyoaktif bozunma kullanılmıştı, çünkü radyoaktif kaynaklar da olasılık kurallarına uyar; fakat biz bunu bölünmüş kutudaki elektronu kullanarak kolayca yeniden düzenleyebiliriz. Schrödinger aynı zamanda deneyin çelik bir odacıkta yapıldığını söylemişti; bu, kuantum folklorunda küçüle küçüle, diğer şeylerin yanı sıra söz konusu kediyi de içine alan bir "kutu"ya indi. Ben "odacık" terimini daha cömert yorumlamayı tercih ediyorum, kediye, hâlâ mümkünken, hayatın tadını çıkaracak kadar bir yer sağlamalı. Fakat bunlardan hiçbiri Schrödinger'in argümanının gücünü etkilemez.

O halde daha önce tarif ettiğim bütün sistemi –çift kutu, tek elektron ve otomatik sürgülü bölme– kapalı, penceresiz bir odada, bir masanın üstüne yerleşmiş olarak düşünün. Bölme kayarak kutuyu ikiye ayırıyor. Elektronun yarım kutularda olma şansı tam olarak yüzde 50. Kutunun dışında bir elektron detektörü var. Eğer bir elektron tespit ederse odayı zehirli gazla dolduracak olan, dışarıya yerleştirilmiş bir aygıta bağlı. Odanın bir köşesinde kendi halinde sessiz bir kedi var. Schrödinger bu düzeneği "gaddar aygıt" olarak tanımlamıştır,[9] fakat unutmayalım ki bu sadece bir "düşünce deneyi"dir ve hiçbir kedi şimdi anlatacağım nahoş durumda bırakılmamıştır.

Schrödinger, elektron kutusunun bir yarısını otomatik olarak açıp eğer elektron oradaysa dışarı çıkmasına izin vermemiz durumunda ne olacağını sorar. Kilitli odada neler olduğunu görecek bir insan gözlemci hâlâ yoktur. Kopenhag Yorumu'na göre elektronun kutunun kapalı yarısında olma şansı hâlâ yüzde 50'dir, ama aynı zamanda elektronun odada serbest olarak bulunma şansı da yüzde 50' dir. Bu bir düşünce deneyi olduğundan detektörümüz o kadar hassastır ki tek bir elektronun odanın içindekilere eklenen varlığını güvenli bir şekilde tespit edebileceğini düşünebiliriz. Eğer elektron kutudan kaçmışsa, makinenin bunu tespit edip zehirli gazı bırakarak kediyi öldürmesi gerekir.

9. Bkz. Wheeler ve Zurek, *Quantum Theory and Measurement*, s. 157.

Hiç kimse bakmasa bile aynı şeyin olacağını düşünebilirsiniz: Elektron kutudan ya kaçar ya kaçmaz. Kaçmazsa kedi güvendedir; kaçarsa detektör elektronu "fark edince" elektronun olasılık dalgası çöker ve kedinin sonu gelir. Fakat Bohr sağduyuya dayalı bu görüşün yanlış olduğunu söylemiştir.

Kuantum kuramının standart yorumu bize şunu söyler: Elektron detektörünün kendisi de kuantum dünyasının mikroskobik varlıklarından (atomlar, moleküller vb.) meydana geldiği için, elektronla etkileşim bu seviyede yer alır, detektör de, olasılık yasaları dahil, kuantum kurallarına tabidir. Bu tabloda bilinçli bir gözlemci (tercihen gaz maskeli, tabii bilinçli kalmayı istiyorsa) içeriye bakmak için kapıyı açıncaya kadar tüm bu sistemin dalga fonksiyonu çökmez. O anda, *sadece* o anda elektron kutunun içinde mi yoksa dışında mı olduğuna "karar verir", detektör bir elektron bulup bulmadığına "karar verir" ve kedi de ölü mü diri mi olduğuna "karar verir". Birisi odanın içine bakıncaya kadar Kopenhag Yorumu içerideki hali "durumların üst-üste-binmesi" olarak tanımlar – ya da Schrödinger'in sözleriyle, "canlı ve ölü kediyi (ifademin kusuruna bakmayın) eşit paylarda birbirine karışmış ya da bulanmış" olarak.[10]

Durumu nasıl görmek istediğinize bağlı olarak odada aynı anda hem ölü hem diri bir kedinin olduğunu ya da kedinin ne ölü ne diri, arada bir yerlerde olduğunu hayal edebilirsiniz. Fakat Kopenhag Yorumu doğruysa, birisi içeri bakana kadar odada ya ölü bir kedi ya da diri bir kedi olduğunu düşünemezsiniz.

Bu argümanın tek amacı Kopenhag Yorumu'nun saçmalığına dikkat çekmektir; o yüzden bazı boşluklar bulursanız şaşırmayın. Buradaki bariz muamma, "bilinçli" gözlemciyi nasıl tanımlayacağımızdır. Kediler zehir soluyarak ölüp ölmediklerini anlayacak yeterliktedirler herhalde. Kedinin odanın içindeki olaylara tepkisi kapıdan içeri bakan insan gözlemcinin yaptığı işi yapamaz mı? Fakat çizgiyi nerede çekeceğiz? İnsan ölçeğinden kuantum dünyasına doğru aşağı indiğimizde bir karınca dalga fonksiyonunu çökertmeye muktedir midir? Ya da bir bakteri?

Bulmacaya başka bir yönden bakalım, kuantum dünyasından yukarı doğru. Elektron detektörünün kendisi de sadece atom ve

10. Wheeler ve Zurek, *Quantum Theory and Measurement*, s. 157.

molekül gibi kuantum varlıklarından meydana geldiği için dalga fonksiyonunu çökertemez demek iyi hoş da – neticede bir insan ya da kedi de atomlardan ve moleküllerden yapılmıştır. Eğer detektör olasılık dalgasını çökertmeye muktedir *değilse*, biz neden olalım? Hayatın, bu anlamıyla, bilinçli bir gözlemciye gereksinimi mi var? Çok gelişmiş bir bilgisayar odaya bakarak dalga fonksiyonunu çökertebilir miydi?

İlk elektrondan daha da ileriye giderek şu soruyu soralım: Kedinin ölü mü diri mi olduğunu anlamak için odaya bakan kişi, gece kilitlenen bir binada yalnızsa durumu ne olur? Katı Kopenhag Yorumu'na göre üst-üste-binme durumu (Schrödinger'in bulamacı) bu gözlemciyi de kapsar, ta ki bina dışındaki birisi deneyin nasıl gittiğini görmek için içeri bakana (ya da belki oyun ne durumda diye telefon edene) kadar. Sadece kedi değil insan gözlemci de biri bakana kadar askıda olabilir. Peki bina dışındaki insana *onların* dalga fonksiyonunu çökertmek için kim bakar? Bütün bu sürecin sonsuza dek bu şekilde devam etmesi gerekmez mi?

Can alıcı soru, kuantum olasılıklarıyla gerçeklik dediğimiz şey arasındaki çizgiyi nerede çektiğimizdir. Bir sistemin "gerçek" olabilmesi ve dalga fonksiyonunu çökertmesi için, mesela, kaç moleküle sahip olması gerekir? Ve sistemin bu numarayı yapabilmesi için bu moleküllerin nasıl düzenlenmesi gerekir?

Şimdilerde filozofların ve kuantum mekaniğinin sırtına binen bulmaca işte bu. Hepsi kuantum mekaniğinin *işe yaradığını* biliyor; fakat *neden* işe yaradığını bilmek ve kimse bakmazken kapalı bir odanın içerisinde neler olup bittiğinin anlaşılır bir resmini görmek istiyorlar. Fakat bu bulmacanın kutudaki kedi bulmacasının basit versiyonunun ileri sürdüğünden bile daha önemli bir tarafı var. Kuantum mekaniğinin anlamına geçmeden önce gizemin daha derin yanlarını Schrödinger'in kedisinin yavruları yardımıyla ortaya çıkaracağım.

Gerçekliğin Başka Bir Yanı*

Fizikteki gelişmelerin ne kadar müthiş olduğunun bir göstergesi de, hiç kimse acaba gerçekten ne oluyor diye bir kediyi bu şekilde kilitlemediyse de, Albert Einstein'ın Schrödinger'in kutudaki kedi bulmacasından hemen önce kurduğu başka bir düşünce deneyinin 1980'lerde fiilen gerçekleşmiş olmasıdır. Fakat Einstein'ın bu düşünce deneyinin gerçekleştiğini görmeye yetişememesi belki de hayırlı olmuştur, çünkü kutudaki kedi bulmacası gibi kuantumun saçmalığını göstermek için tasarlanmış olmasına rağmen, deney fiilen gerçekleştirildiğinde kuantum kuramı bu testi takdirnameyle geçmiştir.

Einstein bu fikri kendi başına geliştirmemişti. 1930'larda Princeton'a taşındıktan hemen sonra Boris Podolsky ve Nathan Rosen ile beraber geliştirdi ve bu bilmece 1935'te ortak adla yayımlandı – Schrödinger'in kutudaki kedi "paradoksu"nu yayımladığı yıl. "EPR paradoksu" olarak bilinir çünkü kuantum gerçekliğinin mantık dışılığını (gündelik sağduyu ölçülerinde) gözler önüne serer.

Bu bulmacayı 1951'de İngiltere'de yaşayan Amerikalı fizikçi David Bohm daha incelikli hale getirmiştir; fakat o sıralarda tamamen düşünce deneyi olarak kalmıştır. Ne var ki, 1960'ların ortalarında Cenova'da, CERN'de çalışan İrlandalı fizikçi John Bell, bu bulmacayı, bir atomdan aynı anda iki farklı yöne yayılan iki foton içeren, gerçekleşmesi ilke olarak mümkün olan bir deneyle ifade etmenin bir yolunu buldu. O sıralarda Bell bile bu deneyin uygulanabilir olduğunu düşünmüyordu. Fakat onu takip eden yaklaşık 20 yıl süresince pek çok araştırmacı Bell'in tanımladığı ilişkileri ölçme zorluğunu yüklendi. Bu deneylerin en anlaşılabilir ve en kesin olanı 1980'lerin başında Paris'te Orsay'de çalışmakta olan Alain Aspect ve meslektaşları tarafından gerçekleştirildi. Hiçbir şüpheye gerek kalmayacak şekilde sağduyunun (ve Einstein'ın) yanıldığını ve gerçekten de kuantum dünyasında yerbilmezliğin hüküm sürdü-

* Buradaki "yan" sözcüğünün İngilizce karşılığı "*aspect*" kelimesidir; yazar bölümde bahsedeceği Alain Aspect'e gönderme yapıyor. –*y.n.*

ğünü gösterdiler. Burada anlatacağım, EPR paradoksunun, Aspect' in test ettiği Bell versiyonudur.

Aspect deneyinde ölçülen fotonların özelliklerine kutuplanma dendi. Kutuplanmayı gözde canlandırmak için, her bir kutuplanmış ışık fotonunun belli bir yönü –aşağıyı, yukarıyı, yanı ya da arada bir yeri– gösteren bir ok taşıdığını düşünebiliriz. Kutuplanmış ışığın davranışında pek çok tuhaf özellik vardır, bunların bir kısmını Üçüncü Bölüm'de ele alıyorum, fakat burada önemli olan şey foton kutuplanmasının bu farklı yönlerini ölçmenin mümkün olması ve bu özelliklerin de kuantum kurallarıyla uyum göstermesidir. Gerçek durumu biraz basitleştirirsek bir fotonun yukarıyı, öteki fotonun yanı işaret etmesi gerekir, fakat kurallarda hangi fotonun ne tarafı göstereceği yoktur. Bir atomdan bu iki foton yayıldığında, Schrödinger'in kedisi gibi, birisi onların kutuplanma durumunu ölçene kadar üst-üste-binme durumunda var olurlar. Ölçüm anında o fotonun dalga fonksiyonu çökerek olası durumlardan birine girer – yukarıyı gösterir diyelim. Aynı anda *öteki* fotonun dalga fonksiyonu da çöküp öteki duruma girmek zorundadır – bu örnekte yanı gösterir. Kimse öteki fotona bakmamıştır ve ölçüm yapıldığı anda bu iki foton birbirlerinden çok uzakta olabilirler (ilke olarak evrenin iki ucunda); fakat bir dalga fonksiyonu çöktüğünde öteki de çöker. Einstein'ın "hayalet işi uzaktan etki" dediği şey budur; bu iki kuantum varlığı (bu örnekte iki foton) adeta birbiriyle sonsuza dek öyle iç içe girmiştir ki, birine dokunulduğunda, birbirlerine ne kadar uzak olurlarsa olsunlar, öteki aynı anda seğirir.

Bu, Einstein'a özellikle ters düşen bir durumdu, çünkü birazdan göreceğimiz gibi onun görelilik kuramı ışığın daima aynı hızla hareket ettiği ve ışıktan yavaş hareket eden hiçbir şeyin ışıktan daha hızlı hale getirilemeyeceği olgusuna dayalıdır. Görelilik kuramına göre, en azından ilk başta anlaşıldığı haliyle, uzayda hiçbir şey iki parçacık arasında aynı anda bir bağ kuramaz. Daha sonra göreceğimiz gibi görelilik kuramı Einstein'ın bile fark ettiğinden daha fazla şey içerebilir, fakat o sırada bu, özellikle onun için, böyle uzaktan etki olasılığına karşı güçlü bir argümandı.

Fakat hayalet işi uzaktan etkiyi doğrulayacak (ya da yalanlayacak) kanıt deneylerle fiilen nasıl elde edilebilir? İki fotonu birden ölçmek işe yaramaz; daima doğru cevapları alırsınız (bu örnekte bi-

ri yukarı, diğeri yana doğru) fakat asla aynı anda meydana gelen bir bağ "göremezsiniz". Bu ölçümleri yapınca bu konuda tek söyleyebileceğiniz her bir fotonun özelliklerinin atomdan ayrıldıktan sonra belirlenmiş olabileceğidir ki, sağduyu da bunu söyler. Uzaktan etkiyi –yerbilmezliği– iş başında yakalamanın yolu birbirine bağlı üç ölçümle çalışıp (üç kutuplanma açısı, Aspect deneyi), gerçekte her foton için bir tane olmak üzere sadece ikisini ölçmekten geçer.

Kutuplanma bilinmeyen bir özellik olduğu için neler olacağını rekler aracılığıyla düşünmek yardımcı olabilir. Yalnız, Aspect ekibinin renkleri bu şekilde ölçmediğini unutmayalım. Diyelim ki atomlar aslında foton çiftleri değil de renkli parçacık çiftleri yayıyor olsun, tıpkı minik bilardo topları gibi. Topların rengi kırmızı, sarı ya da mavi olabilir; fakat her çiftte iki farklı renk olmalı.

Bunu tekrar kuantum diliyle söylersek, atom iki topu zıt yönlere fırlatınca Kopenhag Yorumu bize iki topun da renginin belli olmadığını söyler. İkisi de üst-üste-binmiş olası üç durumda birden bulunur. Deneyci toplardan birine "bakınca" topun dalga fonksiyonu çöker ve belli bir renk alır. Aynı anda öteki topun dalga fonksiyonu da çöker ve o da olası iki renkten birini alır – fakat tek ölçüm yapmış olduğumuzdan hangisi olduğunu bilmeyiz.

Şimdi, mavi olup olmadığını öğrenmek için bir topun ölçümünü yapmak mümkün. Bu sorunun cevabı öteki topun çökerek hangi duruma girdiği hakkında bilgi verecektir, fakat öteki topun durumu hakkında tam bilgi vermeyecektir. Diyelim ki ölçüm sonucumuz "mavi". O zaman öteki topun durumu ya "kırmızı" ya da "sarı" olmak zorundadır. Ölçümümüzün mümkün olan tek öteki sonucu topumuzun "mavi olmadığı"dır. Bu durumda topumuzun gerçekten kırmızı mı yoksa sarı mı olduğunu belirlemediğimiz için öteki top mümkün olan üç renkten herhangi birini almış olabilir, fakat aşağıdaki sebeplerden dolayı mavi olma ihtimali kırmızı ya da sarı olma ihtimalinden daha büyüktür.

Eğer ilk top "mavi"yse, o zaman ikinci top ya "kırmızı"dır ya da "sarı". O halde bu iki renk "durumu"nda bulma ihtimalimiz yüzde 50'dir. Fakat, eğer ilk top mavi değilse kendi durumu için iki farklı ihtimal söz konusudur. İlki, "kırmızı" olabilir. Bu durumda ikinci top ya "mavi" ya da "sarı" olabilir. İkincisi, ilk top "sarı" olabilir. O zaman ikinci top ya "mavi" ya "kırmızı"dır. Demek ki ikinci top

için şimdi *dört* alternatif var. Bu alternatiflerden ikisi "mavi"dir, o halde topun "mavi" olma şansı yüzde 50'dir (2/4). Dört ihtimalden biri "kırmızı" ve biri de "sarı"dır. O halde, topun "kırmızı" olma ihtimali yüzde 25 (1/4), sarı olma ihtimali de yüzde 25'tir. Tabii ki topa bakıldığında üç renkten biri olacaktır ve de yüzdeler toplanınca 100 yapar.

İlk topun durumunu ölçme eylemi ikinci topun durumunu ölçtüğümüz zaman belli bir rengi bulma olasılığını değiştirir. İlk topu ölçüş biçimimize göre olasılığın nasıl değiştiğini görmek için, ölçümleri pek çok defa, pek çok top üzerinde yapmanız gerekir, tıpkı yazı tura atarken net bir şekilde yüzde 50 yazı, yüzde 50 tura modelini görmek istediğinizde pek çok defa yazı tura atmanız gerektiği gibi. Ne var ki buradaki püf noktası şudur: Bell, yerbilmezlik iş başındayken ortaya çıkacak istatistiksel modelin, her bir topun rengini atomdan ayrılırken seçtiği ve sonrasında da o renkte kaldığı zamanki modelden farklı olacağını göstermiştir.

Bu terminolojide deney iki foton hakkında çifter soru sormaktan ibarettir: "Fotonlardan biri mavi mi değil mi ve öteki foton sarı mı değil mi?" Şunu da sorabiliriz: "Fotonlardan biri mavi mi değil mi ve öteki foton kırmızı mı değil mi?" Bu ölçümleri pek çok defa pek çok parçacık çifti için gerçekleştirdiğinizde karşınıza bir cevap listesi çıkar. Buna göre, parçacıkların ne sıklıkta sırayla "mavi ve kırmızı-değil" olarak çiftleştiğini, ne sıklıkta "mavi-değil ve sarı-değil" olarak çiftleştiğini, ne sıklıkta "mavi ve sarı-değil" vs. olarak çiftleştiğini buluruz. Bell'in gösterdiği şey, bu tür soruları pek çok foton çifti kullanarak pek çok defa sorarsanız, aldığınız cevaplarda istatistiksel bir model çıkacağıdır. "Mavi ve sarı-değil" kombinasyonunun, "mavi-değil ve kırmızı-değil" kombinasyonu ve diğer bütün kombinasyonlarla kıyaslandığında ne sıklıkla meydana geldiğini bulabiliriz. Ve tekrar vurgulayayım, sağduyulu parçacıklar atomdan ayrıldıkları an renklerini seçip sonrasında da hep o renkte kaldıkları halde, kuantum varlıkları onlara bakmadığınız sürece hangi renkte olduklarına karar vermedikleri için, kuantum dünyasındaki istatistiksel model sağduyu dünyasındakinden farklıdır.

Bell şunu göstermiştir ki, eğer sağduyu geçerliyse o zaman belli bir ölçüm dizisi –bir davranış modeli, A modeli diyelim– daima başka bir ölçüm dizisinden –ikinci bir davranış modeli, B modeli–

daha sık meydana gelmek zorundadır. Sağduyu mantığı, A modelinin B modelinden daha sık olduğunu söyler. Fakat Aspect deneyi (ve o çizgideki pek çok başka deney) bu eşitsizliğin ihlal edildiğini göstermektedir. A modelinin ortaya çıkma sayısının, B modelinin ortaya çıkma sayısından daha az olduğu ölçülmüştür.

Matematik diliyle ifade edilmiş olsa da buradaki argüman sağduyu mantığına dayalıdır. Mesela sağduyu mantığı der ki, dünyadaki ergen sayısının, ergenlik çağındaki kızlarla her yaştaki erkeklerin toplamından daha az olması gerekir. Aspect deneyinin sonuçları mantıki açıdan dünyadaki ergenlerin, ergen kızlar ile bütün erkeklerin (ergenler *ve* yetişkinler) toplamından daha fazla olduğunu keşfetmekle birdir. Bell'in eşitsizliği ihlal edilmiştir, bu da yerbilmezlik iş başında demektir ve kuantum kuramı haklı çıkmıştır – yine de bütün bu olup bitenlerin *ne anlama* geldiğini *hâlâ* bilmiyoruz.

Bell'in kendisi kuantum kuramını hep "sadece geçici bir çare"[11] olarak görmüştür ve hep fizikçilerin biz bakmasak ya da ölçüm yapmasak da var olacak gerçek bir dünya içinde bu tuhaflıkları bile açıklayabilecek bir kuram bulacaklarını ummuştur. Ne var ki, Aspect deneyinin sonucu bu anlamda umduğunun tersi çıkmışsa da (gerçi kuantum kuramının önceki zaferlerinden sonra *beklentisine* ters değildir), daha sonra fizikçi Nick Herbert'a "bulanık ve karanlık bir bölgede somut ve net bir şeyle karşılaşmaktan büyük sevinç" duyduğunu söylemiştir, bu şey sağduyuya ve kendi önyargılarına ters düşse de.[12]

Aspect deneyinin içerimlerini hafiften daha basit bir deneye aktarırsak, bu keşifler ortaya şunu koyar: Atom iki parçacığı farklı yönlere yayarsa ve kuantum kuralları birinin kırmızı diğerinin sarı olması gerektiğini söyler fakat hangisinin hangi renk olduğunu belirtmezse, o zaman parçacıkların her biri, bilinçli bir gözlemci birisinin hangi renk olduğunu fark edene kadar üst-üste-binme durumunda var olur. O anda o parçacığın dalga fonksiyonu bir şekilde çöker *ve* öteki parçacığın dalga fonksiyonu öteki renk yönünde çöker. Burada yine vurgulamakta yarar var: Bu ne çılgın bir kuramcının uydurduğu bir fikir, ne de çok titizlikle hazırlanmış bir düşün-

11. Davies ve Brown, *The Ghost in the Atom*, s. 51.
12. Herbert'a Mektup, aktaran Herbert, *Quantum Reality*, s. 212.

ce deneyidir. Bu yerbilmez davranışın meydana geldiği, fotonlarla yapılan gerçek deneylerle *ispatlanmıştır*. Deneydeki oyuncuları birazcık değiştirip yerlerine tek bir elektronla bir çift kedi koyarsak Schrödinger'in ünlü düşünce deneyini, Aspect'in Bell eşitsizliği ihlaline ilişkin ölçümlerini de hesaba katacak biçimde güncelleyip, ilk ve son defa yerbilmezliğin ve uzaktan etkinin neler ima ettiğini görebiliriz.

Schrödinger'in Kedisinin Yavruları

İşte kritik an geldi. Bütün ihtişamıyla işte temel sorun.

İki kedi yavrusu düşünün, Schrödinger'in kedisinin ikiz yavruları olsun, her biri otomatik ekipmanın göz kulak olduğu ve bol yiyeceğin bulunduğu bir uzay kapsülünde yaşasın. Bu iki kapsül ince bir boruyla birbirine bağlı olsun. Borunun ortasında, orta bölümünde otomatik sürgülü kapağı olan bir kutu olduğunu hayal edelim ve tabii içinde de –evet tahmin ettiniz!– tek bir elektron. İki kapsülde de, tünelden kapsüle bir elektron geçmesi halinde oradaki kediyi öldürecek o bildik gaddar aygıt. Borunun ortasındaki elektron kutusu boruyu tamamen tıkıyor, dolayısıyla da bir kapsülden ötekine hiçbir şey geçemiyor. Fakat kutunun uçları da sürgülü kapılardan ibaret.

Unutmayalım ki hiç kimse bakmadığı sürece elektronun olasılık dalgası kutuyu homojen biçimde doldurur. Kutunun ortasındaki sürgü kapı kutuyu ikiye bölünce, elektronun sürgünün bir yanında olma olasılığı yüzde 50, öteki yanında olma olasılığı da yüzde 50'dir. Kutunun iki ucundaki sürgüler açılınca olasılık dalgası iki uzay kapsülü içine homojen olarak dağılacaktır. Bu sırada iki kapsülü birleştiren boru, tam elektron kutusunun ortasındaki sürgüden otomatik olarak kesilip ikiye ayrılırsa elimizde iki tane birbiriyle bağlantısız uzay kapsülü olur. İkisinde de otomatik olarak hizmet sunulan bir kedi; bir elektron tespit ettiğinde kediyi öldürecek gaddar bir aygıt ve yüzde 50'lik elektron olasılık dalgası vardır. Elektron dalgası, gaddar aygıt ve kedinin *hepsi* bir üst-üste-binme durumundadır.

Bu sadece bir düşünce deneyi olduğundan, farazi uzay kapsüllerimizi fizik yasalarının elverdiği en iyi itici güce sahip sistemlerle

donatabiliriz – tabii ışıktan daha hızlı yolculuk ettirerek Einstein'ın görelilik kuramını ihlal edecek değiliz. Ayrıca kedilerin güçlü ve uzun ömürlü bir soydan geldiğini varsayıyoruz (gaddar aygıtın izin verdiği ölçüde). Şimdi iki kapsül ayrılınca otomatik roketler bu iki kapsülü uzayda zıt yönlere doğru ateşleyebilir. Birkaç yıl yolculuk ederler. Sonunda bir tanesi uzaktaki bir gezegene ulaşır. Burada bilinçli (akıllı) gözlemciler vardır. Öteki kapsül de o sırada olağanüstü güçlü roketler sayesinde ters yönde bir ışık yılından daha uzağa taşınmıştır.

Akıllı gözlemciler kapsülün içinde ne olduğunu görme merakıyla kapağını açıp içine göz atar. O sırada kapsülün içindekilerin dalga fonksiyonu çöker. İncelenen kapsülün içine o elektronun girip girmediğine "karar verir". Girmişse kedi ölür – daha doğrusu, gözlem yapılınca, kedi zaten, ta elektronun kutusundan bırakıldığı zamandan bu yana, ölmüş durumdadır. Uzaylı yaratıklar ölü kediyi gözlemlediği anda, öteki kedi üst-üste-binme durumundan kurtulup "canlanır". Ya da, uzaylılar kapsülü açtıklarında canlı bir kediyle de karşılaşabilirler. Tabii bu durumda bu gözlemleri öteki kedinin kaderini belirler. Kedilerden ikisi de aynı anda hem ölü hem diri değildir, adeta uzaydaki onca yıl bir ölü bir de diri kedi vardır; ama hangi kapsül hangi kediyi taşımaktadır, bu tam bir muammadır. Ya da iki kapsülde de tarihin alternatif versiyonlarını temsil eden iki hayalet vardır. Gözlem yapıldığı anda bunlardan biri kaybolup giderken öteki gerçek olur.

Kopenhag Yorumu söz konusu olduğunda burada neler olup bittiğini nasıl yorumlayacağınız büyük ölçüde size kalmış. Bu seviyede *hiçbir* resmi "yorum" yok – Kopenhag Yorumu'nun tek söylediği şey şu: Bu deneyi binlerce çift kediyle binlerce defa denerseniz uzaylıların gezegenine inen kedilerin daima yarısı ölü, yarısı diri olarak bulunur, öteki tekler de daima tersi durumdadır. Standart yorumun, dalga fonksiyonu çöktüğünde bir kapsülden ötekine anında işaret veren yerbilmez uzaktan etkinin yanı sıra, bir bakış açısına göre işin içinde zaman yolculuğu unsurunun da bulunduğu çıkarımı hakkında söyleyecek hiçbir şeyi yoktur.

Gözlemleme eyleminin sadece uzayda değil zamanda da geriye doğru, elektronun bırakıldığı ana doğru, hangi kapsüle girdiğini belirleyerek geriye de bir işaret gönderdiğini ileri sürebilirsiniz. As-

lında buna inanmak uzayda anında işaret yollama kavramından daha zor değildir, çünkü Einstein'ın görelilik kuramından çıkan şeylerden birine göre *eğer* bir sinyal ışıktan hızlı seyahat ederse o zaman, zamanda da geriye yolculuk edecektir (bu da tabii böyle ışıktan hızlı işaretleşmelerin neden imkânsız görülüp dikkate alınmadığını açıklıyor.)

Zamanda geriye gidebilecek işaretlerin olabilirliğini kabul etmek aşırı bir uç olarak görülebilir, fakat şayet kuantum dünyasının anlaşılabilir bir yorumuyla bütünleştirilebilirse Schrödinger'in kedisi ve onun yavrularının kaderiyle simgelenen hayalet işi üst-üstebinme durumundan bizi kurtarma gibi bir faydası olabilir. Bell'in kendisi bir keresinde, tercih imkânı olsa nesnel gerçeklik nosyonunu elde tutup sinyallerin ışıktan daha hızlı gidemeyeceği fikrini bir kenara atmayı isteyeceğini söylemiştir.[13] Fakat, bunun neden hem uç bir seçim, hem de (belki) savunulabilir bir tercih olduğunu anlamak için, ışığın doğası hakkında daha çok şey bilmemiz gerekir. Işığın davranışı, fizikçilerin, hem görelilik kuramını hem de kuantum kuramını anlamalarında kilit öneme sahiptir.

Eğer polisiye türü kitapların önce son sayfasına bakan kişilerdenseniz ve görelilik kuramı ile kuantum kuramının standart yorumunu zaten bildiğinizi düşünüyorsanız, o zaman Sonsöz kısmına gönül rahatlığıyla şimdiden göz atabilirsiniz. Böyle yaparsanız, yalnız, geri dönüp kitabın kalan kısmını okumaya söz verin, çünkü bütün iyi polisiye yazarları gibi benim de şimdiyle son arasında sizi eğlendirecek numaralarım var. Bu numaralardan bazıları, bazı usta sihirbazlarınki gibi, aynalarla ilgili; hepsi de ışığın kendisinin gizemli doğasını yansıtıyor.

13. Davies ve Brown, *The Ghost in the Atom*, s. 50.

Birinci Bölüm

Kadim Işık

Bilimde neyi kadim tarih olarak göreceğiniz bakış açınıza bağlıdır. Kuantum mekaniği fikirleriyle bütünleşmeyen evren tariflerine ve evrenin nasıl işlediğine dair açıklamalara –kuramlara ve matematik modellere– genellikle "klasik" kuramlar denir. Bu ölçüte göre Isaac Newton, en az Arşimet kadar klasik bir bilim insanıydı. Hatta, bu tanıma göre Einstein'ın iki görelilik kuramı da klasik kuramlardır. Ne var ki, 20. yüzyıl fiziği iki sütun üzerine kurulmuştur: kuantum kuramı *ve* görelilik kuramı. İkisi de bilim insanlarının dünyaya bakışını değiştirmiştir ve ikisi de 20. yüzyılın başında ortaya çıkmıştır. Yani başka bir perspektiften bilimin kadim tarihi yaklaşık 1900' den önceki her şeyi ilgilendirmektedir. Işığın araştırıldığı kadim tarihten bahsederken kelimeyi bu anlamda kullanıyorum – Eski Yunandan 19. yüzyılda James Clerk Maxwell'in çalışmalarına kadar olan her şey ışığın bir elektromanyetik ışıma biçimi olduğunu göstermiştir.

İlk filozoflar ışığın gözde doğduğunu ve tüm dünyanın doğasını "hissetmek" üzere deniz fenerinin ışık demeti gibi ya da kör bir insanın bastonu gibi dışarıyı yokladığını düşünüyorlardı. Her şeyin dört elementten (toprak, hava, ateş ve su) müteşekkil olduğu fikrinin sahibi, MÖ 5. yüzyılda yaşamış olan Empedokles, Afrodit'in, sevgiyle bir arada duran dört elementle insan gözüne nasıl biçim verdiğini anlatmıştır. Afrodit evrenin ocak ateşindeki gözün ateşini tutuşturmuştu; böylece göz bir fener işlevi görecek, ateşini dünyaya yayıp görmeyi mümkün kılacaktı.[14]

14. Bkz. Kathleen Freeman, *Ancilla.*

Empedokles ışığın bu kadar olmadığını, gece karanlığının dünyanın güneşten gelen ışığın önüne geçmesinden kaynaklandığını fark etmişti. MÖ 3. yüzyılda yaşamış olan Epikuros'un da benzer görüşleri vardı; fikirleri, MÖ 55 tarihli *De Rerum Natura* (Doğa Üzerine) adlı kitabın yazarı olan Romalı Lukretius tarafından şöyle özetlenmiştir: "Güneşin ışığı ve ısısı; bunlar çok küçük atomlardan meydana gelir ve itildikleri zaman itildikleri yönde havaya doğru hızla fırlarlar." Şimdi bakınca zamanına göre son derece doğru bir tasvir gibi görünüyor; fakat bu tasvir o sıralar insanların çoğunun düşündüğü şeyi yansıtmıyor. Görmenin gözden dışarıya doğru giden bir şeyle bağdaştırılması yüzyıllarca sürmüştür. MÖ 428-347 yılları arasında yaşamış olan Platon dahili ışıkla harici ışığın birleşiminden bahsetmiştir. MÖ 330-260 yılları arasında yaşamış olan Öklid başka şeylerin yanı sıra görme eyleminin "işleyiş" hızından kaygı duymuştur. Gözlerinizi kapatıp tekrar açtığınızda uzaktaki yıldızların bile hemen yeniden göründüğüne, oysa görme etkisinin gözlerinizden ta yıldızlara, oradan da tekrar gözlerinize yolculuk etmiş olduğuna dikkat çekmiştir.

Bu fikirler bize garip de gelse, Lukretius'un Epikuros'un çalışmasına olan ilgisine rağmen İsa'dan sonraki ilk bin yılın sonuna kadar ciddi itirazlarla karşılaşmadıkları anlaşılıyor. Sebeplerden biri, tabii ki, Batı uygarlığının Roma İmparatorluğu'nun düşüşünden sonra Karanlık Çağ'a girmesiydi. Romalılar zaten hiçbir zaman bilimle pek ilgilenmemişlerdi ve Jül Sezar zamanında Yunanlıların bilimsel öğretilerinin çoğunun İskenderiye'deki büyük kütüphanenin kazara yanmasıyla kül olması sonucu o zamanların bilimsel düşünceleri de bir daha asla yeniden toplanamadı. İmparatorluk çökünce daha çok kitap imha edildi ya da kayboldu; Avrupa'da geriye kalan "bilimsel" çalışmalar da, bin yılı aşkın bir süre, kadim fikirleri yüceltti ve geride kalan bilgi kırıntılarını korumaya çabaladı.

Herhangi bir çalışma alanında eski Yunana ait fikirlerin ötesine geçmiş ilk bilim insanı, 965-1038 yılları arasında, büyük İslam uygarlığının zirvesinde yaşamış bir Arap âlimdi. Kadim dünya ve bilimsel fikirleri hakkında bildiklerimizin büyük kısmı Yunancadan ya da başka kadim dillerden Arapçaya, sonra da Avrupa dillerine çevrilen belgelerle gelmiştir bize. Kayıtlar Arap dünyasına çoğu zaman doğuda Roma İmparatorluğu –Roma'nın düşüşünden 1453'e

kadar yaklaşık bin yıl ayakta kalmış olan Bizans– aracılığıyla ulaşmıştır. Bizans'la Arap dünyası arasındaki ilişki en hafif deyimle fırtınalıydı, fakat entelektüel fikir alışverişi de vardı.

Arap âlimler eskilerin fikirlerinin üzerine yenilerini inşa edip onları geliştirerek (unutmayın sayı sistemimiz Araplardan gelir) batı Avrupa'ya zengin bir miras ulaştırdılar: bilimsel sorgulamayı yeniden alevlendirmede önemli bir rol oynayan bir miras. Işığın incelenmesi buna iyi bir örnektir.

İlk Modern Bilim İnsanı

Ebu Ali el-Hasan bin el-Heysem Ortaçağ'ın en büyük bilim insanıydı ve 500 yılı aşkın bir süre Galileo, Kepler ve Newton'a kadar başarılarını geçen olmamıştır. Avrupa'da (daha sonra) Alhazen adıyla tanınmıştır. Bilim ve matematiğin çeşitli alanlarında çok sayıda (bugün bilimsel makale diyebileceğimiz) kitap yazmıştır; fakat en büyük eseri MS 1000 yılı civarında optik üzerine yazdığı yedi kitaplık bir dizidir. Bu eser 12. yüzyılın sonunda Latinceye çevrilmiştir (tüm Avrupa'da Newton'un çağının epey sonrasına kadar hâlâ tahsilli insanların kullandığı düşünce ve bilim dili); fakat Avrupa'da ancak 1572'de (yine Latince) *Opticae thesaurus* (Optik Hazinesi) adıyla basılmıştır. Bu eser yaygın biçimde incelenmiş ve Avrupa'da 17. yüzyılda bilim devrimini başlatmış düşünürler üzerinde büyük etkide bulunmuştur.

Alhazen görmenin dış dünyayı yoklamak için gözden bir tür dahili ışığın dışarı çıkmasının sonucu olmadığını, tam tersine, dış dünyadan göze giren ışığın sonucu olduğunu ileri sürerken bunu pek çok mantık argümanıyla desteklemiştir. Argümanlarından biri artimaj diye bilinen olayla ilgilidir. Parlak bir ışığa yaklaşık yarım dakika gözlerinizi dikip sonra gözlerinizi kaparsanız, o parlak ışığın dış hatlarını "görürsünüz", tabii genellikle başka bir renkte (tamamlayıcı renk).[15] Bu artimaj bazen gözlerinizi açtıktan sonra da "gözlerinizin önünde benekler" halinde kalmaya devam edebilir. Alhazen bunun ancak dışarıdan gözleri etkileyen bir şey sonucunda ola-

15. Fakat asla güneşe doğrudan bakmayın; çok kısa süreliğine bile olsa güneşe bakmak gözlerinize kalıcı zararlar verebilir.

bileceğini ileri sürüyordu. Bu şey etkinin, ışığın ne içeri girebileceği ne de dışarı çıkabileceği gözün kapalı olduğu durumda da sürmesini sağlayacak kadar güçlü bir iz yaratıyordu.

Alhazen'e göre ışık etkisinin göze dışarıdan geldiğini kanıtlayan başka örnekler de vardı. Işığın davranışına dair bilimsel bir anlayışın geliştirilmesine en büyük etkiyi, resimlerin "*camera obscura*" içinde oluşması meselesini ele alış tarzı yapmıştır. Kelime anlamı "karanlık oda" olan bu fenomeni eski âlimler kesinlikle biliyorlardı; fakat bu fenomenin elimizdeki en eski ve açık tarifi Alhazen'in yazılarında bulunmaktadır. Bu fenomeni iş başında görmek için güneşin pırıl pırıl parladığı bir gün karanlık bir odada ayakta durun ve pencereyi kalın bir kumaşla örtün. Kumaşta minik bir delik açın –yaklaşık tükenmez kalemin ucundaki bilye kadar– ve odaya buradan ışık girmesini sağlayın. Göreceğiniz şey dışarıdaki dünyanın pencerenin karşısındaki duvara ters olarak düşmüş tam renkli resmidir.

Bu etki heyecan verici ve eğlencelidir; o kadar ki, bugün televizyon çağında bile bazı şehirler (İskoçya'daki Edinburgh dahil) turistlerin ilgisini çekmek amacıyla *camera obscura*'nın modern versiyonlarını kurmuşlardır. Aynı fenomen iğne deliği fotoğraf makinesinde de olur. Burada karanlık "oda" bir ayakkabı kutusu ya da o büyüklükte bir şeydir. Bir ucunda iğne deliği olan kutunun kesilmiş karşı ucundaki bir kopya kâğıdı da perde görevi yapar. Deliği ışıkta, kutunun perde kısmını ve başınızı ise gölgede tutarak baktığınızda (mesela ceketinizi kafanızın üzerine geçirebilirsiniz) bu minik perdede dünyanın ters dönmüş bir resmini görürsünüz. *Camera obscura* daha sonra fotoğraf makinesine dönüşmüştür. Peki ama nasıl çalışır?

Alhazen'in fark ettiği gibi kilit nokta ışığın doğrusal hareket etmesidir. Bahçede *camera obscura*'nın gördüğü belli uzaklıktaki bir ağacı düşünün. Ağacın tepesinden gelip perdedeki delikten geçen düz bir çizgi, karşıdaki duvarın yere yakın bir noktasına doğru devam edecektir. Fakat ağacın dibinden gelen düz bir çizgi delikten yukarı doğru geçecek ve duvarın tavana yakın bir noktasına çarpacaktır. Ağaçtaki diğer bütün noktalardan gelen doğrular delikten geçip benzer şekilde tam yerlerine çarpacaklardır. Sonuç ağacın (ve bahçedeki başka her şeyin) baş aşağı çevrilmiş resmidir.

Alhazen ışığın güneşte ve dünyadaki alevlerde meydana gelen minik parçacık demetlerinden oluştuğunu düşünüyordu. Bunlar doğrusal olarak hareket edip çarptıkları nesnelerden geri sekiyorlardı. Güneşten gelen ışık bahçedeki ağaçtan seker, perdedeki delikten geçerek karanlık odanın arka duvarından da sekip nihayet gözlerinize gelir, işte bu yüzden *camera obscura*'da resmi görebilirsiniz. Alhazen ışığın, çok hızlı olmasına rağmen, sonsuz bir hızla yol alamayacağını anlamıştı – düz bir çubuğun, bir ucu suya daldırılınca eğilmiş gibi görünmesini düşünmüş ve bu etkinin, yani kırılmanın, ışığın suda ve havada farklı hızlarda yolculuk etmesinin sonucu olduğunu fark etmişti. Aynı zamanda mercekleri ve bükey aynaları da inceleyip merceğin kırılma sayesinde ışığı odakladığını buldu.

Fakat Avrupa 11. yüzyılda bütün bunlar için hazır değildi. Alhazen'in uzattığı bayrağı ilk alan kişi Johannes Kepler oldu. Bugün daha çok gezegenlerin güneşin etrafında dönme yasalarını keşfetmesiyle tanınır; 1571-1630 yılları arasında yaşamıştır. 17. yüzyılın başlarında Kepler Alhazen'in *Opticae thesaurus*'taki açıklamalarından yola çıkıp insan gözünü iğne deliği fotoğraf makinesi gibi tanımladı. Işığın gözbebeğinden girdiğini ve gözün arkasındaki bölge olan retinada dış dünyanın bir resmini oluşturduğunu söyledi. Resim retinada ters olacağına göre nasıl olup da bizim dünyayı "doğru şekilde düz" gördüğümüz muammasına yüzyıllar boyunca cevap bulunamadı – René Descartes ölü bir öküzün gözünü alıp arkasını şeffaf hale getirene kadar kazıdıktan sonra retinada oluşan resme bakarak gerçekten ters çevrildiğini ispatlamıştı. Artık bugün beynin baş aşağı duran resmi otomatik olarak düzelttiğini biliyoruz, tıpkı televizyonun kendisi ters dursa bile ekrandaki resmin elektronik olarak ters çevrilebildiği gibi.

Bu sıralarda (Descartes 1596-1650 yılları arasında yaşamıştır) ışığa büyük bir ilgi vardı. 1564'te (William Shakespeare'le aynı yılda) doğmuş ve 1642'de (Isaac Newton'un doğduğu yıl) ölmüş olan Galileo Galilei gözlük üreten bir Hollandalının 1608 yılında teleskobu icat ettiğini duyup hemen kendi de bir tane yaptı ve aleti gökyüzüne çevirip modern astronomi bilimini icat etti. Teleskoptan hemen sonra mikroskop icat edildi. Böylece bilim insanlarına hem içeriyi, çok küçük olanın dünyasını; hem de dışarıyı, yani tüm evreni araştırma şansı verilmiş oldu. Galileo teleskobu kullanarak 1610'da

Jüpiter'in dört büyük uydusunu keşfetti; 1676'da bu uyduların hareketlerinin incelenmesi sonucunda ilk defa ışık hızını ölçmek mümkün oldu.

Bu numara Danimarkalı astronom Ole Rømer tarafından gerçekleştirildi. Rømer Jüpiter'in uydularının tutulma süresini esas aldı. Tutulmaların zamanlamasını dünya ile Jüpiter'in güneşin aynı tarafında ya da ters tarafında olması etkiliyor gibiydi; Rømer tutulma zamanlamalarının arasındaki farkları, dünya güneşin öbür tarafındayken ışığın uydulardan dünyaya ulaşması için gereken fazladan zamana bağlamıştır. İşin içine birkaç modern sayı koyarsak, ışığın saniyede 300 000 km hızla, güneşten bize, dünyanın yörüngesinin yarı çapı kadar bir mesafeyi kat ederek ulaşması sekiz dakikadan fazla sürer. Dolayısıyla, Jüpiter'in uydularından birinin tutulmasını gözlemlerken kaydedilebilecek maksimum "gecikme" bunun iki katıdır – çeyrek saatten fazla.

Ne var ki, Rømer'in ışık hızının nasıl ölçüleceğini gösterdiği yıllarda sadece optik çalışmalarını değil, tüm bilimi dönüştürecek kişi İngiltere'de bilim camiasının dikkatini çekti. 1672'de Isaac Newton ilk bilimsel tezini, ışığın doğası üzerine, yayımladı.

Woolsthorpe'dan Cambridge'e – ve Tekrar Woolsthorpe'a

Newton hiçbir zaman tam bir bilim insanı olmadı – en azından üniversite eğitimi almış bir Kraliyet Bilim Cemiyeti üyesi değildi. 1642 yılının Noel günü[16] Lincolnshire'da Grantham yakınlarındaki Woolsthorpe'da prematüre, minik, hastalıklı bir bebek olarak geldi dünyaya; yaşayacağını sanmıyorlardı, ilk haftasını çıkaramaz diye düşünüyorlardı. Aynı adı taşıyan babası Isaac, Newton doğmadan ölmüştü – fakat bu durum, sonrasında oğul Isaac'in yararına olmuş olabilir. Isaac doğduktan üç yıl sonra annesi yeniden evlenip komşu köy North Witham'a taşınınca Isaac'i ninesiyle dedesinin yanına

16. O zamanlar İngiltere'de hâlâ kullanılmakta olan eski takvimin gösterdiği tarihti bu; Avrupa kıtasındaysa, Papa'nın takvimin mevsimlerle aynı gitmesi için gerçekleştirdiği reformların sonucunda tarih çoktan 4 Ocak 1643 olmuştu.

gönderdiler. Isaac'ten önce Newton ailesinden kimse tahsil görmemişti. Daha kendi adını bile yazamayan çiftçi babası yaşasaydı onun da durumu farklı olmayacaktı, genç Isaac'in kendisi de çiftçiliğe mahkûm olacaktı. Fakat, annesinin ailesi olan Ayscough'lar toplumda Newton'lardan daha yüksek bir yerdeydiler. Isaac'in dedesi James Ayscough bir asilzadeydi ve annesi Hannah'nın Cambridge Trinity College mezunu erkek kardeşi William rahip olup yakındaki bir kilisede görev almıştı.

Newton'un çocukluğu yalnızlıkla geçti –üvey babası evine adım attırmazdı– fakat gündüz okullarına gitmekle ilk eğitimini almış oldu ve çiftçi Isaac Newton'un oğlu olarak kalacağı hayattan açıkça daha üstün bir hayat tarzı gördü. 1653'te üvey babası ölünce küçük Isaac'in annesi Woolsthorpe'a döndü ve tekrar birlikte yaşamaya başladılar. Ne var ki tekrar bir araya gelmenin sevinci biraz gölgelenmiş olsa gerekti, zira annesinin şefkatini paylaşacağı bir üvey erkek kardeşi, iki de üvey kız kardeşi olmuştu. Bundan iki yıl sonra, 12 yaşındaki Isaac Grantham'daki ortaokula gönderildi ve Clark adındaki bir eczacının evinde pansiyoner olarak kalmaya başladı.

Annesinden defalarca uzak kalması, yalnızlığı, bunların da ötesinde babasını hiç tanımamış olması yetişkin Newton'un bahtsız kişiliğine mutlaka katkıda bulunmuştur – ketumdu, aksiydi, aptallara tahammülsüzdü, sık sık da intihal suçlamaları ve kıdemle ilgili müthiş akademik kavgalara karışıyordu. Okulda başarılı olmasına, nadir zeki insanlardan (ama aynı zamanda kesinlikle tuhaf) biri olarak görülmesine rağmen, Newton'un bilimsel şöhrete giden yola sağlam bir şekilde koyulmasının önünde bir engel daha vardı. 17 yaşındayken annesi çiftçiliği öğrenmesi için onu Woolsthorpe'a götürmüştü, niyeti kendi işini ona devretmekti. Newton bu işte tam bir ümitsiz vakaydı. Annesi oğlunun çiftçi olması yolundaki umudunu yitirirken Newton'un dayısı William üniversiteye hazırlık için okula geri dönmesinde ısrar etti. Grantham'ın müdürü Stokes daha da ikna ediciydi. Genç adamın kendi evinde kalabileceğini ve okul harcında indirim yapacağını söylüyordu, yeter ki kıymetli öğrencisi geri gelsindi. 1660'ta, 11 yıl süren parlamentosuz ara dönemden sonra II. Charles'ın tekrar İngiltere tahtına döndüğü yıl, Hannah rıza gösterdi ve Isaac Grantham'daki eğitimine geri döndü. Sonunda Haziran 1661'de Cambridge'e doğru yola çıktı. Artık geri dönüş yoktu.

Cambridge'deki resmi müfredat 1660'larda hâlâ, başta Aristoteles olmak üzere Yunan filozoflarının eski fikirlerine dayanıyordu. Newton derslerine yeterince çalışıp diplomasını 1665'te aldı. Fakat aynı zamanda, Kepler, Galileo ve Descartes gibi daha modern düşünürlerin eserlerini de okuyup 17. yüzyılın ortalarındaki yeni bilimi de öğrenmişti. 1665'te Londra'da veba salgını başlayınca Cambridge Üniversitesi kapandı, Newton da memleketi Lincolnshire'a geri döndü. Burada iki yıl kaldı, öğrendikleri üzerine kafa yorup evrenin işleyişi hakkındaki kendi fikirlerini geliştirmeye başladı. İşte bu iki yıllık zaman zarfında yüksek matematiği icat edip kendi kütle çekim kuramını geliştirdi, kendi ışık ve renk kuramını ortaya koydu. Fakat bunlardan hiçbiri yıllarca hiçbir yerde açıklanmadı; Newton için bu problemleri çözmek yeterliydi. Meslektaşları (Newton'un ne işler çevirdiğini anladıkları zaman), onu çalışmalarının meyvelerini herkes görsün diye bir şeyler yayımlamaya ikna etmek için akla karayı seçtiler.

1660'lara gelindiğinde ışık hakkında iki rakip kuram vardı. Fransız fizikçi Pierre Gassendi'nin (1592-1655) benimsediği kurama göre ışık, tahayyül edilemeyecek hızla hareket eden minik parçacık seliydi. Descartes tarafından öne sürülen öteki kurama göreyse, bir yerden bir yere fiziksel olarak hareket eden bir şey yerine, evren gözlere baskı yapan ("*plenum*" [dolgunluk] adı verilen) bir maddeyle doluydu. Bu basınç ya da "harekete eğilim", görme denilen olayı meydana getiriyordu. Güneş gibi parlak bir cismin hareketi, dışarıya doğru bir itme uyguluyordu. Bu itme, anında aktarılıp parlak cisme bakan insan gözü tarafından hissediliyordu.

İki savın da sorunları vardı. Eğer ışık minik parçacıkların akışıysa, iki insan yüz yüze gelip birbirlerinin gözünün içine baktığında ne olur? Öte yandan, görmek *plenum*'un göz üzerindeki basıncıyla oluyorsa (Newton'un kendi defterinde belirttiği gibi) gece koşan insan etrafını görebilmeli, zira koşucunun hareketi *plenum*'un gözlere basınç yapmasını sağlayacaktır.

Newton ışığın parçacık (tanecik) akışı olduğunu ileri süren kuramı destekliyordu – özellikle de kendi mekanik yasaları parçacıkların davranışını açıklamada başarılı olduğu için. Temelde aynı yasaları güneşin etrafındaki gezegenlerin hareketlerine, top güllesinin uçuşuna ya da ışık parçacıklarının davranışına da uygulayabilece-

ğini düşünüyordu. Bir anlamda fiziğin bir birleşik kuramını oluşturmaya çalışıyordu; yaşadığı dönemin 300 yıl ötesindeydi. Fakat 1661'de Newton Cambridge'e gittiğinde Descartes'ın rakip görüşündeki gelişmeler daha ümit vaat edici olmaya başlamıştı.

İlk haliyle Descartes'ın ışık kuramı göze uygulanan sabit bir basıncı öngörüyordu. Fakat bunu, parlak bir nesneden dışa yayılan basınç atışları (*pulses*) içeren bir kuram haline getirmek için küçük bir adım yetmişti. Bu atışlar gölcükteki halka dalgacıklar gibi değil, elinizle gölcüğün yüzeyine tokat attığınızda gölcükteki suyun içinde hareket eden basınç atışları gibi (tamı tamına sesin, kaynağından dışarı doğru nasıl yayıldığını açıklayan, şimdi bildiğimiz basınç dalgalarına denk düşen) dalgalar yaratıyordu. 1660'ların başlarında, en azından iki kişi, İngiltere'de Robert Hooke ve Hollanda'da Christiaan Huygens bu çerçevede düşünerek ışığın tam tekmil dalga kuramını geliştirme yolunda ilerlemeye başlamışlardı.

Birazdan Hooke hakkında daha fazla bilgi vereceğim. Huygens, geçerken değinmekten daha fazlasını hak ediyor, zira Newton'dan sonra zamanının en büyük fizikçilerindendir – hiç azımsanacak bir şey değil, çünkü Newton hâlâ gelmiş geçmiş en büyük fizikçi olarak görülür.

Newton'un Gölgesinde

Huygens 1629'da Lahey'de doğmuştur. Aile hayatı Newton'unkinden son derece farklıydı; babası diplomat ve şairdi, Orange Kraliyet Ailesi için nesillerce diplomatik görevlerde bulunmuş bir aileden geliyordu. Gençliğinde Orange Prensi'nin ordusunda hizmet veren ve 1628-1649 yılları arasında Hollanda'da yaşamış olan Descartes, Huygens ailesini sık sık ziyaret ederdi. Christiaan'ın kariyer seçiminde bunun önemli bir etkisi olmuş olabilir. Huygens matematik ve hukuk eğitimi almış ve aile geleneğini devam ettirerek diplomatik kariyer elde etmiştir. Fakat 1649'da okul eğitimini tamamladıktan sonra yurda dönmüş ve sonraki 16 yılı babasının verdiği harçlıklarla soylu bir bilim insanı olarak geçirmiştir.

Böylesi ayrıcalıklı bir özgeçmişe ve kaprislerini yerine getirecek güçte ve istekte bir aileye sahip olan Huygens için doğa bilimi-

ne merak sarıp hevesli, amatör bir bilim insanı olmak zor olmasa gerekti. Fakat bilimin her cephesine karşı ilgi duyuyordu, belli alanlarda önemli katkılarda da bulundu. Sıradan bir hevesli olmanın çok ötesine geçip o kadar başarılı olmuş, o kadar tanınmıştı ki, Fransız Kraliyet Bilim Akademisi 1666'da kurulduğunda Huygens oradaki kurucu yedi üyeden biri olarak çalışmak üzere davet edildi. 1681'e kadar orada kaldı. Daha sonra kısmen sağlığı kötüye gittiği için, kısmen de Katolik Fransa'da Protestan görüşlerinden dolayı zulüm görme tehdidinden kaçmak için Hollanda'ya döndü. Yurtdışına arada bir çıktı. Bir keresinde de 1689'da Londra'ya gitti ve burada Isaac Newton'la tanıştı. 1695'te Lahey'de öldü.

Huygens bir açıdan Newton gibiydi. Fikirlerini yayımlamayı hep geciktirdi. Gerçi bunun asıl sebebi yazıları basılmadan önce noktasına virgülüne kadar her şeyin kesinlikle kusursuz olması için gösterdiği aşırı titizliğiydi. Bu saplantılı özen, 17. yüzyıl bilimine yaptığı ilk büyük katkı olan sarkaçlı saat üzerinde çalışırken çok işine yaradı.

Galileo 1581'de sallanan sarkacın düzenli bir ritim tutturduğunun farkına varmış olsa da, salıntının büyüklüğü ne olursa olsun, Huygens 1650'lerde pratik bir tasarım buluncaya kadar hiç kimse sarkacın düzenli salıntısından doğru bir saat yapmayı başaramamıştı. Huygens'in tasarımıyla çalışan ilk saat 1657'de yapıldı; bir yıl sonra kilise kulelerindeki sarkaçlı saatler tüm Hollanda'da sıradan bir görüntü oluşturmaya başlamıştı. Bu icat ayrıca zamanı doğru ölçme bakımından bilimin de çehresini değiştirmiştir – mesela Rømer'in ışık hızını belirlemesinde ve astronominin başka alanlarında hayati öneme sahiptir. Huygens 1674'te kule saatinden bir adım daha ileri giderek ilk kol saatini geliştirmiştir. Bu saat zemberekle çalışıyor, sarkaç yerine nazım çarkla kontrol ediliyordu (Hooke bağımsız olarak aynı fikri bulmuşsa da ilk çalışan örneği Huygen geliştirmiştir).

Huygens teleskoplar da tasarlamış, astronomi gözlemleri yapmıştır. 1655'te Satürn'ün en büyük uydusu Titan'ı keşfetmiştir ve Satürn'ün halkalarının doğasını doğru olarak tarif eden ilk kişidir. Astronomi çalışmaları ve daha iyi teleskoplar yapma çabası sayesinde ışığın doğasıyla ilgilenmeye başlamış, bunun sonucunda da en büyük başarısı, yani ışığın tam tekmil çözümlenmiş dalga kura-

mı ortaya çıkmıştır. Esas olarak 1678'de tamamlanmış olan kuram ancak 1690'da tam olarak yayımlanmıştır. Huygens'in kuramı ışığın aynadan nasıl yansıdığını ve havadan cama ya da suya geçtiğinde nasıl kırıldığını (büküldüğünü) açıklayabiliyordu. Descartes'ın fikrinden yola çıkarak ışığın birbiriyle çarpışıp duran parçacıkların hareketi olduğunu öngörüyordu. Bunlar birbirini dürterek küresel bir basınç dalgası olarak kaynağından yayılıyordu. Kuramı özellikle önemli bir tahmini ortaya koyuyordu: Kırılmanın açıklanması için, ışığın daha yoğun ortamlarda (cam ya da su gibi), daha az yoğun ortamlara göre (hava gibi) daha yavaş gitmesi gerekiyordu.

Huygens'in talihsizliği Newton'un gölgesi altında kalmış olmasıydı. Newton'un "doğa felsefesi"ndeki nefes kesici başarıları –hareket yasaları ve kütle çekimi kuramı– 1687'de ünlü *Principia*'da yayımlanmıştı. Işık hakkındaki görüşlerinden bir kısmı 15 yıl öncesinde yayımlanmıştı, fakat kuramı bir bütün olarak –birazdan anlaşılacak sebeplerden dolayı– 1704'e kadar yayımlanmadı. Newton'un en büyük bilim dâhisi olarak hak ettiği şöhreti sayesinde, 18. yüzyılda hareket yasaları ve kütle çekimi kuramı kadar ışık hakkındaki fikirleri de kutsal kitap gibi görülüyordu. Newton'un ışıkla ilgili görüşleri ışığın parçacıklardan oluştuğu yönündeydi – yani, tabii ki, Huygens'in kuramı yanlış olmak zorundaydı. Fakat dâhiler bile bazen hata yapar, zaten parçacık hipotezi Newton'un ışık kuramının kesinlikle en önemli özelliği değildi. Asıl renkler kuramıyla ilk olarak zamanının bilim camiasının dikkatini çekmişti – Huygens'in ışık üzerine yaptığı çalışma gibi, Newton'un kuramı da astronomiyle bağlantılıydı.

Newton'un Dünya Görüşü

Newton'un renk kuramının önemi sadece o konuda haklı olmasından değil, aynı zamanda sonuçlara varma biçiminden gelir. Newton'dan önce filozofların doğal dünya hakkındaki görüşlerini geliştirme şekilleri çoğunlukla salt düşünmekten ibaretti. Örneğin Descartes ışığın parlak bir cisimden göze yayılıyor olabileceğini düşünmüş ama fikirlerini test etmek için deneyler yapmamıştır. Tabii ilk deney yapan Newton değildi – özellikle Galileo eğik düzlem üze-

rinde yuvarlanan topları incelemesiyle ve sarkaçlar üzerine yaptığı çalışmayla yolu açmıştı. Fakat Newton bilimsel yöntem denen şeyin temelini açıkça ifade eden ilk kişi olmuştur – modern bilimin dayanağı olan fikir (hipotez), gözlem ve deney kombinasyonu.

Newton'un renk kuramı Cambridge Üniversitesi'nden aldığı zorunlu tatil sırasında yaptığı deneylerde ortaya çıkmıştır. 1665'e gelindiğinde, güneş ışığının üçgen bir cam prizmadan geçtiğinde gökkuşağı gibi renk tayfına dönüşebileceği gayet iyi biliniyordu. Bu durumun standart açıklaması beyaz ışığın saf, katkısız olduğu ve camdan geçerek kirlendiği yönündeki Aristotelesçi görüşe dayanıyordu. Işık prizmaya girince bükülür ve sonra üçgenin öteki tarafına düz olarak gider, oradan da tekrar bükülüp havaya çıkar. Aynı zamanda da ışık tek bir beyaz noktadan dışarıya bir renk şeridi halinde yayılır. Üçgenin tepesinden aşağı doğru giderken ışık tepede en az bükülür ve camda en yakın mesafede yolculuk ederek kırmızı olarak çıkar. Aşağıda, camın genişliğinin fazla olduğu kısımda, prizmaya girerken birazcık daha fazla bükülen ışık camda daha ileri gider ve öteki taraftan havaya mor olarak çıkar. İkisi arasında gökkuşağının bütün renkleri vardır – kırmızı, turuncu, sarı, yeşil, mavi, çivit ve mor. Perdedeki küçük bir delikten karanlık bir odaya giren ışık demetine bir prizma tutulursa (*camera obscura* gibi bir düzenek), pencerenin karşısındaki duvarda renk tayfı görülebilir.

Aristotelesçi görüşe göre camda en kısa mesafeyi geçmiş olan beyaz ışık en az değişime uğrayıp kırmızı ışık olmuştur. Camda biraz daha uzun mesafeyi geçmiş olan beyaz ışık daha fazla değişime uğrayıp sarı olmuştur – ve bu mora kadar böyle devam eder.

Newton bu fikirleri kendi yaptığı prizmalarla ve renk değişimini en aza indirmeye çalışarak farklı biçimlerde kestiği merceklerle fiilen denemiştir. Farklı renk demetlerini ayırt eden ilk kişi Newton'dur ve renk tayfının yedi rengine adlarını vermiştir (tayfı kasten yediye bölmüştür çünkü yedi sözde mistik yan anlamları olan asal bir sayıdır; eğer gökkuşağındaki ayrı bir renk olan "çivit mavisi"yle mavi ve moru birbirinden ayırt etmede zorluk çekiyorsanız kesinlikle yalnız değilsiniz!).

Newton'un bu sırada yaptığı en önemli deney ilk prizmanın arkasına ikinci bir cam takoz yerleştirmekten ibaretti, fakat bu takozun öteki yüzü yukarı bakıyordu. Yukarı bakan ilk prizma bir be-

yaz ışık öbeğini gökkuşağı renklerine ayırıyordu. Aşağıya bakan ikinci prizmaysa tayfın yayılmış renklerini tekrar birleştirip bir beyaz ışık öbeğine çeviriyordu. Işık camda daha da fazla yolculuk yapmasına rağmen bozulmuyor, tekrar ilk arılığına dönüyordu.

Newton'un fark ettiği gibi beyaz ışık hiç de "arı" değildir, aksine gökkuşağının bütün renklerinin bir karışımıdır. Kırılma olduğunda farklı ışık renkleri farklı miktarlarda bükülürler, fakat bütün renkler başlangıçtaki beyaz ışık öbeğinde mevcuttur. Bu, devrim yaratan bir fikirdi, hem Aristoteles felsefesinin temel bir ilkesini altüst ettiği hem de sağlam deney temeline dayandığı için. Fakat Newton keşfini dünyaya söylemekte acele etmiyordu. Bunun yerine, 1655' te ışığın doğası hakkında edindiği içgörü onu teleskop yapmada yeni bir yaklaşım uygulamaya yöneltmişti.

Büyük mercek kullanan teleskopların (mercekli teleskoplar) sorunlarından biri merceklerin de beyaz ışığı renk tayfına ayırma eğiliminde olmasıdır. Bu, renkli gölgeler yaratır ve bakılan nesneyi bulanık gösterir. Renk sapması denilen bu olay yıldızları incelemek isterseniz özellikle elverişsiz bir durumdur. Newton buna sebep olmayacak bir mercek sistemini kurmanın zor olacağının farkındaydı (zor, ama imkânsız değil; farklı kırılma özelliklerine sahip iki ya da daha fazla cam parçadan yapılan "akromatik" mercekler renk sapmasına sebep olmayan teleskop yapımında kullanılabilir). Bunun üzerine büyük mercekler yerine bükey bir ayna kullanarak bir teleskop tasarladı ve imal etti – aynalı teleskop.

Newton'un yansıtıcısı şu parlak fikre dayalıydı: Teleskobun arkasındaki büyük bükey bir aynadan yansıtılan ışık 45 derece eğimli küçük düz bir aynaya gelerek oradan görüntüyü teleskop gövdesinin yan tarafındaki deliğine gönderecekti. Gözlemci, başıyla güneşten gelen ışığı kesmeden bu delikten bakarak yıldızları gözlemleyebilecekti. Basit ama harika bir fikirdi bu; ne var ki, eldeki malzemeyle uygun aynayı yapmak uzman bir maketçi olan Newton'un kendisinin üstlendiği meşakkatli bir işti. Sonuçta ortaya çıkan yaklaşık 15 cm (6 inç) uzunluğunda bir aletti, onun dört katı uzunluğundaki mercekli teleskoplardan dokuz kat büyük görüntüler elde edebiliyordu – üstelik renk sapması oluşturmadan.

Veba tehlikesinin azalmaya başladığı o sıralar üniversite yeniden açılmış ve Newton Cambridge'e geri dönmüştü. 1667'de Tri-

nity College'a öğretim görevlisi seçildi. Aynı yıl İngiltere Hollanda'yla savaş halindeydi ve Hollanda donanması Thames'de İngilizlere karşı başarılı bir hücumda bulunmuştu. Topların sesi Cambridge'den duyuluyordu ve herkes bunun sebebini biliyordu; Newton Hollandalıların muharebeyi kazandığını iddia ederek (sonradan haklı olduğu çıktı ortaya) meslektaşlarını etkilemişti. Newton'un gerekçesi şuydu: Top atışlarının sesi gittikçe yükseliyordu, demek ki muharebe gittikçe yaklaşıyordu, yani İngilizler geri çekiliyordu.

1669'a gelindiğinde Newton matematik alanındaki çalışmalarından dolayı Cambridge dışında da tanınmaya başlamıştı. O yıl Lucas Matematik Profesörlerinin ilki olan Isaac Barrow (1663'te atanmıştı) istifa etti ve bu da Newton'un lehine oldu. Başarılı bir matematikçi olmasına rağmen Barrow'un başka emelleri vardı ve çok geçmeden önce Kralın papazı, sonra da Trinity College müdürü oldu. Barrow'un, Lucas Kürsüsü'nü kuran Henry Lucas'ın vasiyetini yerine getirenler üzerindeki etkisi, kendisinden sonra gelecek kişinin yine Trinity'den, yakın zamanda matematik alanında isim yapmış biri olmasını sağladı.

Bu atama Newton'un Cambridge'deki yerini sağlamlaştırmıştı, fakat bir dizi düzenli ders vermesi gerekiyordu. İlk ders dizisi için seçtiği konu matematik değil, optik ve renk kuramıydı. Teleskoplardaki renk sapmasına da özel yer ayırmıştı. Aynı zamanda yeni teleskobunu Cambridge'de ve civarında bulunan meslektaşlarına gururla gösteriyordu; hatta Newton'un bugüne kadar gelen Şubat 1669 tarihli en eski mektuplarından biri (kime yazıldığı bilinmiyor) büyük oranda bu teleskobu anlatır.

Bu olağanüstü aletin haberi 1671'in sonlarında Kraliyet Cemiyeti'ne ulaştı (cemiyet 1645'ten beri gayriresmi yapıda mevcudiyetini sürdürmüşse de resmi olarak 1662'de kurulmuştu) ve cemiyetin başkanı Henry Oldenburg teleskobu görmek istedi. Barrow teleskobu Newton adına Londra'daki cemiyete gönderdi. Ocak 1672'de Oldenburg Newton'a icadıyla ilgili övgü dolu bir mektup yazıp, teleskop haberinin o sırada Paris'te bulunan Huygens'e iletildiğini de haber verdi. Böylece Newton'un yeni bir tür teleskobun mucidi olarak ünü Avrupa ana kıtasına yayılmıştı; bu icadından dolayı 11 Ocak 1672'de Kraliyet Cemiyeti'ne öğretim görevlisi seçildi. Birkaç hafta sonra da renk kuramını ortaya koyan ilk fizik makalesi

Oldenburg'a yazılmış bir mektup şeklinde yayımlandı. 19 Şubat 1672'de Cemiyet'in çıkardığı *Philosophical Transactions*'da yerini aldı ve Newton'un meşhur akademik kavgalarından ilkine sebep oldu.

1635'te doğmuş ve 1703'e kadar da yaşayacak olan Robert Hooke o sırada Kraliyet Cemiyeti'nin Deney Sorumlusuydu. Bilim dünyasında adını kabul ettirmiş bir isimdi, ışık ve renk hakkında kendi fikirleri vardı (Huygens'inkinden daha eksik olan kendi ışık dalga kuramı 1665'te yayımlanmıştı) ve daima bütün çalışmaları için öncelik iddia etmeye istekliydi. Newton'un mektubuna yukarıdan bakan bir tavırla cevap yazarak ışığın taneciklerden oluşabileceği fikrini kabul etmemiş, renk kuramının da aslında tanecik hipotezine dayanmadığını görememişti. Karşılıklı sert yazışmalar sırasında Hooke Newton'un kuramında özgün olan şeyin yanlış olduğunu, doğru olan şeyin de özgün olmadığını ima etti. Ortaya çıkan kavganın iki etkisi oldu. Newton genel olarak bilim camiasından çekilip Cambridge'de kendi halinde yaşamaya başladı ve pek bir şey yayımlamadı (Hooke ölene kadar, tamamlanmış optik kuramını bağrına bastı. Ölünce tamamını yayımlayıp son sözü söylemiş olacaktı). İkincisi, Newton'un şu ünlü sözüne vesile oldu: "Daha ileriyi gördümse Devlerin omuzlarında dikildiğim içindir." Hooke'un ufak yapısına gönderme yapan ve aynı zamanda zekâ olarak da ufak olduğunu ima eden alaycı bir sözdü bu.[17]

Ne var ki, renk kuramını eleştiren başka biriyle yaptığı yazışmalarda Newton kendi çalışma yönteminin –yani artık bilimsel yöntem denilen şeyin– iyice kavranmasını sağladı. Fransız Cizvit Ignace Gaston Pardies Newton'a Paris'ten yazıp Newton'un belli ki saygılı bulduğu bir uslupla kuramı hakkında birkaç şey söyledi. Newton Pardies'a aptal muamelesi yapmayıp argümanlarını daha ayrıntılı açıkladı:

Öyle görünüyor ki felsefe yapmanın en iyi ve en güvenli yolu önce şeylerin özelliklerini dur durak demeden incelemek ve bu özellikleri deneyler-

17. Devler alıntısının Newton'un kütle çekimi kuramıyla bir ilgisi yok. 1675'te Hooke'a yazılmış bir mektuptan geliyor, *Principia* yayımlanmadan 12 yıl öncesinden. Hooke'la olan kavganın ayrıntıları için bkz. Gribbin, *In Search of the Edge of Time*, Birinci Bölüm.

de tespit etmek, sonrasında da yavaş yavaş bunları açıklayan hipotezlere doğru gitmek. Hipotezler sadece şeylerin özelliklerini açıklamak için kullanılmalıdır, yoksa onları belirlemek için varsayılmamalıdır; en azından birtakım deneyler düzenlememizi sağlamadıkları sürece.[18]

Bilim denilen şey de zaten budur. Kuramınız ne kadar harika olursa olsun, deney sonuçlarıyla örtüşmüyorsa doğru olamaz. Örneğin, Newton'un ışık kuramı da (belki de "hipotezi" dememiz gerekir; gerçi Hooke bu fikirler için bu deyimi kullandığında Newton kızmıştı) kırılmayı ışığın bir ortamdan başka bir ortama geçtiğinde hızındaki değişiklikle açıklar. Fakat Huygens'in kuramının aksine tanecik kuramına göre ışığın daha yoğun ortamlarda *daha hızlı* yol alması gerekir. İşte iki fikri birbirinden ayırmanın açık seçik bir yolu; Newton ışığın aslında daha yoğun ortamda daha yavaş yol aldığını gösteren deneyleri görebilseydi o zaman ışığın dalga olarak hareket ettiğini kesin kabul ederdi.

Newton dünyanın işleyişini araştıran bilimsel yöntemi kurmanın yanı sıra (Huygens ve çağdaşlarıyla) gerçekliğin ilk bilimsel paradigmasını, yani modelini de kurmuştur. Buna göre evren belli kurallara ya da yasalara uyuyordu ve güneşin etrafındaki gezegenlerin hareketleriyle bir ışık demetinin bükülmesi kadar birbirinden farklı olaylar, kaprisli tanrıların keyfi işleri olarak değil bu kuralların uygulanmasıyla açıklanabilirdi.

On yedinci yüzyıl biliminin devlerinden günümüze gelen imge genellikle, yerinde bir tespitle, değiştirilemez kurallara uyarak "saat gibi işleyen evren" imgesidir. Fakat doğru imge, ilerleyen saniyeleri birer birer gösteren modern saat ya da kol saati değil. Daha ziyade, 17. yüzyılın büyük bir katedral saatini düşünmeliyiz, Huygens'in tasarımıyla yapılmış koskoca sarkaçlı bir saat. Dişliler, çarklar sadece saati çalıştırmıyor, aynı zamanda aziz resimlerinin olduğu o incelikli görüntüyü hareket ettirip çanları çalıyor ve başka mekanik işleri belirlenmiş saatlerde yerine getiren karmaşık mekanizmayı çalıştırıyor. İşte gezegenlerin güneşin etrafında dans ettiği keşfinin ve başka doğa olaylarının açıklanmasının yolunu yapan 17. yüzyıl biliminin "saat gibi işleyen evren" imgesinin modeli buydu.

18. Aktaran Westfall, *Never at Rest*, s. 242.

Newton'un mirası, evrendeki her şeyin davranışının katedral saatlerindeki aziz figürlerinin hareketleri gibi önceden bilinebilir olduğu fikri *ile* insan beyninin anlayabileceği nispeten kolay yasaların evrenin işlemesini sağlayan şeyi anlamaya yeterli olduğu fikrini birleştirir. Bu başarıların ışığı altında, ışığın doğasını anlama konusundaki bu ileri adımın Newton'un tanecik kuramının yanlış olduğunu göstermesi önemini yitiriyor. Ama yine de önemli bir adımdı bu.

Genç Fikirler*

Işığın dalga olarak yol aldığının doğrudan kanıtı Newton'un zamanında zaten vardı. Fakat kanıt biraz zayıftı, bu çalışma pek bilinmiyordu ve fenomenin açıklaması tamam değildi. Bu kanıt Newton gibi, karanlık bir odaya küçük bir delikten giren bir ışık demetinin davranışını inceleyen İtalyan fizikçi Francesco Grimaldi (1618-63) tarafından ortaya konulmuştu. Grimaldi ışık demeti ikinci bir küçük delikten geçip bir perdeye yansıyınca perdedeki ışık beneğinin delikten hafif büyük olduğunu ve renkli saçaklar yaptığını keşfetmişti. Işık küçük delikten geçerken farklı renkler farklı miktarlarda olmak üzere biraz dağılmıştı.

Ayrıca, ışığın karşısına küçük bir engel konulduğunda, perdede görünen gölgenin kenarları renkliydi. Burada ışık gölgenin saçaklarına sızmıştı; gölgenin içine dağılmış ve yine farklı renkler farklı miktarlarda yayılmıştı. Bu iki etki de çok küçüktür, fakat dikkatli gözlem ve ölçümle tespit edilebilir. Grimaldi bu fenomen ailesine kırınım adını vermişti – yansıma ve kırılmayla birlikte ışığı göndermenin üçüncü yolu. Ama Grimaldi'nin kırınım hakkındaki bu çalışması ancak 1665'te, ölümünden iki yıl sonra yayımlanmıştı. Bu yüzden bilim camiasının Newton'un fikirleriyle heyecanla ilgilendiği sırada ışığın dalga kuramını savunması mümkün değildi. Hooke da ışığın tam bir doğru halinde yol almadığını, yoluna çıkan nesnenin gölgesinin kenarlarına sızdığını keşfetmişti. Fakat Newton tamam-

* Yazar "genç" sözcüğünün İngilizce karşılığı olan "*young*" kelimesini kullanarak, bu kısımda bahsedeceği Thomas Young'a gönderme yapıyor.

lanmış optik kuramını yayımladığında Hooke'un neden dalga kuramını savunmak için ortalarda olmadığını görmüştük.

Newton'un fikirleri 18. yüzyıldaki bilimsel düşünceye hâkim olsa da ışığın dalga kuramını savunanlar da yok değildi. Bu fikrin en önde giden destekçisi 1707'de Basel'de doğmuş İsviçreli matematikçi Leonhard Euler'di. Newton 1727'de öldüğünde Euler'in yirminci doğum gününe sadece birkaç hafta vardı. Euler bütün zamanların büyük matematikçilerinden biriydi, hem kuramsal matematikle hem de gelgit olayları, sıvı mekaniği, Newton'un yasalarını kullanarak gök cisimlerinin hareketlerini tahmin etme ve benzeri alanlardaki uygulamalarıyla ilgileniyordu. Büyük bir bilim insanı olsa da bazen aptalca hatalar yapıyordu. 1730'larda Rusya'da St Petersburg'da matematik profesörüyken astronomi çalışması sırasında güneşe bakması sonucu sağ gözü görme yeteneğini kaybetti. Otuz yıl sonra St Petersburg'a Bilim Akademisi Müdürü olarak geri döndüğünde (Büyük Katherina zamanı) katarakt nedeniyle öteki gözü de görmez oldu; fakat görevinde kaldı, 1783'te ölene kadar bütün görev ve sorumluluklarını yerine getirdi. Hayatının son 15 yılı boyunca matematikçi olarak faaldi. Hesapları tamamen kafasından yapıyor ve keşiflerini bir asistanına yazdırıyordu. 76 yaşında öldüğü gün, zamanının bir kısmını yenilerde icat edilmiş sıcak hava dolu balonların yükselme yasalarını hesaplayarak geçirmişti.

Euler'in ışık kuramı St Petersburg'da kaldığı iki kısa dönem arasında, Büyük Frederick'in Berlin'deki Bilim Akademisi'nde çalışırken 1746'da yayımlanmıştır. Bu çalışma ışığın minik parçacıkların bir akışı olarak yolculuk ettiği fikrinin içerdiği bütün o güçlüklere (kırınımı bu şekilde açıklamanın güçlüğü de dahil) işaret etmiş ve ışığın titreşimleriyle ses dalgalarının titreşimleri arasındaki özel benzerliği ortaya koymuştur. O sıralarda titreşimi sağlayan ortam için kullanılan terim "*plenum*"dan "esir"e dönüşmüştü. Euler 1760'larda yazdığı bir mektupta "ses havaya göre neyse" güneş ışığı da "esire göre odur" demiş, güneşi de "ışık çalan bir çan" olarak tasvir etmişti.[19] Ama yine de dünya ikna olmamıştı. Dalga kuramının ancak bu fikri test etmek için yeni deneyler yapıldıktan sonra tanecik kuramının yerine geçmiş olması önemli bir noktadır. Newton'un tane-

19. Aktaran Zajonc, *Catching the Light*, s. 99.

cik ışık kuramı, bilimin yapılma biçimine dair Newtoncu paradigmanın doğrudan uygulanması sonucunda baş aşağı edilmiştir.

İlk adım 1773'te doğan ve Euler öldüğünde 10 yaşında olan Britanyalı fizikçi Thomas Young tarafından atılmıştır. Yaş burada önemsiz görünebilir; fakat Young gerçekten dâhi bir çocuktu. Pek çok insanın bir ömre sığdırdığından daha fazlasını bu on yıla sığdırmıştı. İki yaşındayken İngilizce okuyabiliyor ve ona pek düşkün olan dedesinin verdiği kitapları hatmediyordu. Altı yaşında Latinceye geçti, sonra da başka dillere; 16 yaşına geldiğinde Latince, Yunanca, Fransızca, İtalyanca, İbranice, Aramice, Süryanice, Samiriye, Arapça, Farsça, Türkçe ve Etiyopyaca anlayabiliyordu. Bildiği dillerden de anlaşılacağı üzere Young küçük yaştan beri arkeoloji ve eski tarihle ilgileniyordu; aslında neredeyse her şeyle ilgileniyordu. 1792' de, 19 yaşındayken, tıp öğrenmeye başladı, Londra'da tıp mesleğini icra eden varlıklı bir aile büyüğünün yanına gitmeyi düşünüyordu. Londra'da, Edinburgh'da ve Göttingen'de eğitim gördü ve hekimlik diplomasını 1796'da bu Alman üniversitesinden aldı. Fakat tıp öğrenciliğinin ilk yılında gözün odaklanma mekanizmasını kasların gözdeki merceğin şeklini değiştirmesiyle açıklamış, bu çalışması sayesinde de daha öğrenciyken 21 yaşında Kraliyet Cemiyeti' ne üye seçilmişti.

Young hekimlik diplomasını aldıktan sonra Almanya'da seyahat etti, sonra Cambridge'de iki yıl çalıştı, çok çeşitli bilimsel çalışmalar gerçekleştirip çok yönlülüğünden dolayı "Fenomen Young" lakabını aldı. 1800'de Londra'ya döndü ve hekimlik yapmaya başladı, daha sonra St George Hastanesi'nde hekim olarak çalışmaya başladı. 1811'den 1829'da öldüğü güne kadar burada çalıştı. Fakat tıp pek çok ilgi alanından sadece biri olarak kaldı.

Young astigmatizmi gözdeki korneanın kıvrımındaki bozukluklar olarak açıkladı. Renkli görmenin, gözdeki farklı alıcı sinirleri etkileyen sadece üç rengin (kırmızı, yeşil, mavi) bir kombinasyonuyla gerçekleştiğini fark eden ilk insandı. Fizik alanında önemli çalışmalar yaptı (moleküllerin büyüklükleri hakkındaki ilk tahmin de dahil). Kraliyet Cemiyeti'nin Dışişleri Bakanlığını yaptı (hiç kuşkusuz dillerinden bazıları işe yaramıştır). 1815'ten itibaren, erken yaşta başlayan kadim tarih ilgisine geri döndü. Eski Mısır uygarlığı üzerine makaleler yayımladı ve 1799'da Nil Nehri'nin ağzı yakınla-

rında bulunmuş olan Rosetta Taşı'nın deşifre edilmesine yardımcı oldu (Young muhtemelen Rosetta Taşı'nın üzerindeki kadim yazıları çözmede başrolü oynamıştı, fakat bu sorun üzerindeki asıl çalışması *Encyclopaedia Britannica*'nın ekinde imzasız olarak yayımlandığı için tam hakkı verilmedi). Fakat bu ve başka her şeye rağmen Young en çok ışığın girişim fenomenini incelemesiyle hatırlanır.

Girişimle ilgili ilk deneyler Cambridge'de olduğu 1797-99 yılları arasında gerçekleştirilmiştir; Londra'ya döndüğünde deneyler devam etmiş ve 19. yüzyılın başlarında Young dalga kuramının yanında yer alarak Britanyalı kuşkucu bir bilim cemiyetine bu deneylerin net ve doğru açıklamalarını sunmuştur. Young bu kitabın Önsöz kısmında anlatılan temel girişim deneyini hem iki yuvarlak iğne deliğiyle hem de iki dar yarıkla gerçekleştirmiştir (daha doğrusu icat etmiştir). Dahası, bazı şekillerde, Newton'un ışıkla yaptığı kendi deneylerinin bazılarını dalga kuramını kullanarak açıklamıştır. Işığın her bir renginin belli bir dalga boyuna karşılık geldiğini ve ışığın bükülme, kırılma ya da kırınma miktarının dalga boyuna bağlı olduğunu fark etmiştir. Bu bilgilerle donanınca, Newton' un kendi verilerini kullanarak kırmızı ışığın dalga boyunu 6.5×10^{-7}, mor ışığınkini de 4.4×10^{-7} olarak hesaplamıştır. Bu iki rakam da bugün kabul edilmiş değerlere uymaktadır. Bu da, Young'ın ne kadar iyi bir kuramcı, Newton'un da ne kadar hassas ölçüm yapan bir deneyci olduğunu gösterir. Rakamlar aynı zamanda, ışığın dalga olarak yol aldığını ispat etmenin neden bu kadar uzun sürdüğünü de gösteriyor. Bu dalga boyları çok miniktir –yaklaşık, bir metrenin milyonda birinin yarısı– ve kırınım etkisinin büyüklüğü yuvarlak hesapla söz konusu dalga boylarıyla kıyaslanır durumdadır. Işığın bir nesnenin kenarından geçmesiyle oluşan bükülme miktarı sadece metrenin milyonda birkaçı kadardır. Fakat, ışık çift yarık düzeneğinden geçerken neler olduğunu, ne kadar minik olursa olsun sadece dalgalar açıklayabilir.

1807'de, Newton öldükten sadece 80 yıl sonra Young iki delikli deneyi aşağıdaki şekilde özetlemiştir:

[Örüntünün] ortası daima aydınlık, her iki taraftaki parlak şeritler öyle aralıklı ki, deliklerin birinden gelen ışığın ötekinden gelen ışıktan, farz edilen dalgalanmanın [dalga boyunun] bir, iki, üç ya da daha fazlasının enine eşit mesafe kadar daha uzun bir yol kat etmiş olması gerekir. Aralardaki karan-

lık bölümler ise, farz edilen yarım, bir buçuk, iki buçuk ya da daha fazla dalgalanmanın farkına karşılık gelir.[20]

Bu tarif tamamen doğrudur. On yıl sonra Young ışık dalgalarının boylamsal olmaktan (ses dalgaları ya da akordeonun körükleri gibi hareket yönünde ileri geri gitmekten) ziyade enine olduğunu (gittiği yönde bir yandan öbür yana dalgalandığını) ileri sürdü.

Bütün bunların ışığın dalga doğasını ispatlamada yeterli olacağını düşünebilirsiniz. Ne var ki, Young bile zamanının bilim camiasını Newton'un ışığın doğası hakkında yanılmış olduğuna ikna edemedi. Newton'un herhangi bir konuda yanıldığını ileri sürmenin kesinlikle yurtseverliğe yakışmadığına, hatta haysiyetsizlik olduğuna dair yaygın bir hissiyatın var olmasının yanı sıra, iki ışık demetinin birbirine *eklenmesiyle* karanlık elde etme fikri Young'ın pek çok meslektaşı için anlaşılmaz bir şeydi. Biz bu fikre alıştık, tamamen dalga kuramıyla tarif edilen iki delik deneyi sağduyumuza son derece normal geliyor. Fakat 19. yüzyılın başlarında sağduyu iki ışık demetini birbirine ekleyince parlaklığın artması gerektiğini söylüyordu; iki ışık demetini birbirine ekleyerek karanlık elde etme fikri, Young'ın çağdaşlarından birisinin dediği gibi, "insan hipotezleri tarihinde bugüne kadar karşılaştığımız en anlaşılmaz varsayımlardan biri"ydi.[21] Belki de uygun bir tesadüfle, Newton'un tanecik hipotezine son "Britanya ruhuna aykırı" darbe Young'ın çalışmasından habersiz olan bir Fransızdan geldi (tek bir kısa ara dışında Britanya'yla Fransa'nın 1799-1815 arası savaşta oldukları düşünülünce bunda şaşılacak bir şey yok).

Augustin Fresnel 1788'de Normandiya'nın Broglie kentinde dünyaya geldi. 1809'da mühendis oldu ve Fransa'nın çeşitli bölgelerinde devletin yol projeleri üzerinde çalıştı. Optiğe olan ilgisi sadece hobiden ibaretti ve Young'ın çalışmalarından Britanya-Fransa savaşı sırasında bile belki haberdar olan bilim çevrelerinin içinde değildi. Napolyon yenilip Elbe adasına sürgüne gidince, Fresnel Kralcı olarak "çıkageldi"; Napolyon 1815'te Yüz Gün için Elbe adasından döndüğündeyse Fresnel ya protesto ederek görevini bıraktı ya da

20. Aktaran Baierlein, *From Newton to Einstein*, s. 95.
21. Henry, Lord Brougham, aktaran Zajonc, *Catching the Light*, s. 110.

atıldı (kayıtlar net değil). Her halükârda Normandiya'daki evinde göz hapsine alınmıştı. Işık hakkındaki yarım yamalak fikirlerini tam tekmil bir kurama burada dönüştürdü. Napolyon nihayet tahttan indirildiğinde Fresnel mühendislik işine geri döndü ve optik bir kere daha yarı zamanlı ilgi alanı haline geldi.[22] Fakat boş zamanında, zorla verilen o tatil döneminde, ışığın yayılmasını açıklayan parçacık kuramını nihayet gömmeye yetecek kadar iş yapmıştı.

Fresnel, Poisson ve Parlak Nokta

Fresnel'in 1815'te Young'ın çalışmasını bilmiyor olması çok şaşırtıcı gelmeyebilir ama, Huygens'in ve Euler'in çalışmaları hakkında bir şey bilmiyor olması epey şaşırtıcı gelecektir. Ne var ki görünüşe göre durum buydu. Dalga kuramı tamamen kendi çalışmasıydı ve bunu kırınım fenomeninin en basit açıklaması olarak geliştirmişti. Perçinleyici kanıt, bazı açılardan iki delik deneyinden de basit, ama daha da şaşırtıcı bir deneyle ortaya çıktı.

Aslında tek bir yarık (tek delik) kullanarak kırınımın ve girişimin yarattığı şeritler halindeki örüntüyü görebilirsiniz – bunu yapmak için öyle gelişmiş bir teçhizata ihtiyacınız yoktur. Elinizi yüzünüze neredeyse dokunacak kadar yakın tutmaya çalışın. Ortadaki iki parmağınız arasından parlak bir ışığa bakın, sonra parmaklarınızı aradaki boşluk daha da kapanacak şekilde yavaşça sıkın. Boşluk tümden kapanmadan hemen önce parmaklarınız arasındaki "yarık"tan karanlık şeritlerden oluşan bir örüntü göreceksiniz. Aralığın ortasında bir ya da iki koyu çizgi görebilirsiniz, daha dikkatli bakarsanız birkaç tane de görebilirsiniz.

Fizikçiler aynı şeyi tek bir dar yarık kullanıp yarıktan çıkan ışığı bir perdeye yansıtarak yapabilirler. Fenomenin tam açıklaması gayet kolay, fakat işin içinde az bir miktar hesap kitap var; bunun sebebini, ışığın tek bir yarığın iki kenarından geçerken bükülüp gö-

22. Bu çalışmanın bir kısmı pratik hayatta kullanıldı; 1820'de Fresnel bir dizi eşmerkezli halkadan yapılmış bir tür mercek geliştirdi. Hâlâ Fresnel'in adıyla anılan bu mercek deniz feneri ya da başka uygulamalardan gelen ışık demetini yoğunlaştırmada kullanılır.

zünüze ya da yarığın arkasındaki perdeye iki ayrı yoldan iki ayrı dalga boyuyla gitmesi olarak düşünebilirsiniz. Işığın dalga doğasıyla ilgili olarak Fresnel'in kilit kanıtı, bu tek yarık kırınımı deneyini bir ışık demetinin önüne tek bir küçük engel koyup ışığın nesnenin kenarlarında bükülmesi sonucu gölgesinde meydana gelen girişim etkilerine bakarak tersyüz etmiştir. Bu biraz da deniz dalgalarının bir kayanın etrafındaki suları dövme biçimine benzer, ama daha küçük bir ölçekte.

1817'de, Napolyon savaşlarının nihayet sonu geldiğinde, Fransız Bilim Akademisi, Young'ın çalışmasından etkilenip (muhtemelen hâlâ Fresnel'in çalışmasından habersiz) ışığın doğasının ne olduğunu kesin bir çözüme kavuşturmaya karar verdi. Kırınım fenomenine ilişkin en iyi deneysel incelemeyi sunacak *ve* deneydeki ışığın davranışını tatminkâr bir şekilde açıklayan bir kuram öne sürecek kişiye ödül verileceği duyuruldu. Yarışma sadece Fransızlara değil herkese açık olmasına rağmen sadece iki başvuru geldi. Bir tanesi, belli ki, çatlak birinin başvurusuydu; tarih, bırakın deneyin ayrıntılarını, bu çalışmayı sunan kişinin adını bile vermiyor. Öteki başvuru 135 sayfa süren teferruatlı bir tez biçiminde Fresnel'den geldi. Tabii o kazandı – fakat 1819 Martında kararı açıklamak için toplanan jüriden muhalif olanlar da vardı. Jüri üyeleri arasında matematikçi Siméon Poisson, fizikçi Jean Biot ve astronom Pierre Laplace bulunuyordu. Hepsi Newton'un kuramının sıkı destekçisiydi.

Fresnel hiç de kötü bir matematikçi değildi, çeşitli kırınım şartları altında ışığın davranışını matematik diliyle formel olarak açıklamak için Newton'un ve Wilhelm Leibniz'in geliştirdiği yüksek matematik tekniklerini kullandı. Fakat bazı denklemler o kadar karmaşıktı ki, Fresnel bile belli şartlarda ışığın bükülme şekliyle ilgili ayrıntıları bulmak için bunları tam olarak çözemedi. Ne var ki Poisson, koyu Newtoncu olmasına rağmen ateşli bir matematikçiydi. 1781-1840 yılları arasında yaşamış ve olasılık çalışmaları, yüksek matematik, elektrik ve manyetizmanın davranışı ve başka pek çok alanda önemli katkılarda bulunmuştu. Fresnel'in örneklerinden birini havada kapıp ilgili denklemleri çözdü ve jüri üyesi arkadaşlarına dalga kuramının altındaki dayanağı ilk ve son defa çekecek olan, olmayana ergi yöntemine dayalı bir argüman sundu.

Bir gölgenin *kenarı*ndaki renkli saçağın ışık dalgalarının kırını-

mıyla meydana gelmiş olabileceği fikri en azından dalgaların hareket etme şekline ilişkin, sağduyunun kabul ettiği fikirlerle örtüşüyordu. Fakat Poisson'un yaptığı hesaplara göre Fresnel'in kuramı, bir ışık demeti önüne yerleştirilmiş küçük yuvarlak bir nesnenin *hemen arkasında*, nesnenin gölgesinin tamı tamına merkezinde minik parlak bir nokta olacağını söylüyordu. Karanlık gölgenin merkezindeki bu tek noktayı meydana getirmek için engelin kenarlarından bükülen ışık dalgalarının birleşmesi gerekir. Saçma! Poisson hesaplamalarının sonuçlarını şöyle açıklıyordu:

Mat bir disk üzerine paralel ışık vursun, çevresi de tamamen şeffaf olsun. Diskin gölgesi düşer –tabii ki– fakat gölgenin tam merkezi parlak olacaktır. Kısaca, mat bir diskin arkasındaki merkezi dik açı boyunca hiç karanlık olmaz (diskin hemen arkası hariç). Hatta, ışığın şiddeti ince diskin hemen arkasından sıfırdan başlayarak sürekli yükselecektir. Diskin arkasında, çapı kadar bir mesafede şiddet çoktan diskin olmaması halindeki şiddetin yüzde 80'i olmuştur. Bundan sonra şiddet daha yavaş artar, diskin olmaması durumundaki şiddetin yüzde 100'üne yaklaşır.[23]

Fakat elbette, iyi Newtoncular olarak jürinin Fresnel'in kuramını salt mantık ve sağduyuya dayalı akıl yürütme yoluyla kınamaya hiç niyeti yoktu. Newton'un artık standart hale gelen, hipotezleri deneyle test etme yöntemiyle jüri başkanı François Arago yapılacak deneyi ayarladı. Gerçekten de gölgenin tam ortasında minik bir ışık noktasının olduğunu gördü (şu güne dek Poisson noktası diye bilinir). Yuvarlak diskler dışında küçük toplarda da görünür, mesela pompalı tüfek saçmalarında. Fresnel haklıydı; Newton yanılmıştı. Bunun üzerine Arago, Bilim Akademisi Kurulu'nun Mart 1819'da yaptığı toplantıda şunları bildirdi:

Komisyon üyelerinizden M. Poisson, yazarın [Fresnel] bildirdiği entegrallerden şu tek sonuca varmıştır: Yuvarlak mat bir perdenin gölgesinin merkezi, oraya nüfuz eden ışınlar ancak bir parça eğik olduğunda, sanki perde orada yokmuşçasına aynı derecede aydınlanabilir. *Sonuç doğrudan bir deneyin testine tabi tutulmuş ve yapılan gözlem hesaplamayı mükemmel biçimde doğrulamıştır.*[24]

23. Aktaran Baierlein, *Newton to Einstein*, s. 102.
24. Baierlein, *Newton to Einstein*, s.103; italikler bana ait.

Meselenin özü budur. Kuramlar ancak deneylerle doğrulanırsa geçerlidir; söz konusu deney sonuçlarının bize söyledikleri "doğru" olmalı ve her iyi kurama dahil edilmelidir. Bu sonuçlar istediği kadar tuhaf olsun –Önsöz'de anlatılan elektronların ikili doğası gibi– öylece kenara itilip kuramlarımızdan *çıkarılamaz.*

Tabii ödül heyetinin onaylamasıyla Fresnel'in ünü kesinleşmişti. Arago'yla ışığın kutuplanması hakkında uzun zamandır var olan muammaları açıklayan enine dalga kuramının bazı kısımları üzerine çalıştı. Işık dalgalarının gerçekten enine olduğunu tespit etmede önemli bir adımdı bu. Ayrıca ışığın sudaki hızını ölçecek bir deney önerdi; deney 1850'de yapıldı ve dalga kuramının aynen öngördüğü gibi, ışığın suda havada olduğundan daha yavaş hareket ettiğini gösterdi – fakat artık zaten ışığın dalga olarak yol aldığına kimsenin ikna edilmesi gerekmiyordu. Fresnel 1823'te Fransız Bilim Akademisi'ne seçildi ve Newton'un ölümünden yüz yıl sonra, tüberkülozdan ölmeden hemen önce, 1827'de Kraliyet Cemiyeti Üyesi oldu. Fresnel öldüğünde daha 39 yaşındaydı. 1829'da 56'ncı doğum gününe bir ay kala ölen Young ondan uzun yaşadı. İki yıl sonra, ışık dalgalarının doğasını nihayet açıklayacak olan adam İskoçya'nın Edinburgh kentinde doğdu. Fakat James Clerk Maxwell'in ışığın doğasına ilişkin açıklamasını dayandırdığı, elektrikle manyetizmanın etkileşim kuramı, 1820'lerde hem Young hem Fresnel hâlâ hayattayken çoktan geliştirilmeye başlanmıştı.

Ciltçinin Çırağı

Michael Faraday 1791'de doğmuş, mütevazı bir aileden gelmesine ve okul eğitimi almamasına rağmen azim, kabiliyet ve biraz da şansın yardımıyla 19. yüzyılın en büyük deneysel bilim insanı olmuştur. Faraday, Surrey vilayetindeki Newington kasabasında yaşayan fakir bir demircinin dört çocuğundan biriydi. O sırada burası hâlâ kırsal kesimdi, şimdi tabii Londra Southwark'un kazası olarak orayı da yuttu. Aile daha sonra kuzey Londra'ya taşındı ve Faraday 13 yaşında bir kitapçı ve ciltçinin getir götür işlerine bakmaya başladı. Matematikten neredeyse bihaber olmasına rağmen hasbelkader okumayı öğrenmişti, kitaplarla da çevrelenince ne var ne yok büyük

bir iştahla hepsini hatmetti. Devrim kargaşasından kaçıp Manş'ı geçmiş olan Fransız göçmen patronu onu teşvik edip ciltçi çırağı olarak işe aldı. Faraday sonraki yedi yıl boyunca işini iyi öğrendi, daha sonra deneysel bilim insanı olarak işine yarayacak el becerileri geliştirdi; ayrıca eline ne geçtiyse okudu ve *Encyclopaedia Britannica*'daki elektriğe ayrılmış bölümden özellikle çok etkilendi.

Faraday 1810'da, 19 yaşındayken Şehir Felsefe Cemiyeti'ne katıldı ve bilimsel konulardaki dersleri düzenli olarak takip etti. Temel fizik ve kimya öğrendi, deney çalışmalarında yer aldı. Ayrıca derslerde ayrıntılı, doğru ve tertipli notlar alıp bunları kitap formuna soktu. Bu kitaplar bilimde bir kariyer için ona kapıları açtı.

Faraday'ın patronu M. Ribeau dükkândaki müşterilerine Faraday'ın ciltler dolusu ders notlarını gösterirdi. Müşterilerden biri Faraday'ın bilime yönelik heyecanından etkilenmiş ve ciltçinin çırağının Sir Humphrey Davy'nin Kraliyet Enstitüsü'nde vermekte olduğu dersleri takip etmesini sağlamıştı. Davy'nin dersleri müthişti; kendisi o sırada İngiltere'deki en ünlü bilim insanıydı. 1778'de doğmuş ve başka şeylerin yanı sıra azot oksidi ("gülme gazı") tıbbi anestezide kullanım için geliştirmiştir. En büyük fiili başarısı, derin kömür yataklarında sık sık rastlanan doğal gazın ateş alması riskini en aza indiren emniyet lambasının icadıdır; Davy lambası maden ocaklarında kullanılan standart tasarım olmuştur.

Zaten bilime âşık olan Faraday Davy'nin dersleriyle daha da ateşlenmişti. Çıraklık döneminin sonuna gelmek üzereydi (1812) ve bundan sonrası için kendine meslek olarak ciltçiliği değil bilimi seçti. Davy'nin ders notlarını ayrıntılı biçimde yazıp kitap formuna getirdi. Bilim alanında ne iş olsa yapmaya hazırdı ama tek bir iş bile bulamadı. Hiçbir müstakbel patron işsiz ciltçiyi müstakbel bir bilim insanı olarak ciddiye almıyordu. Kurduğu tek bağlantı da başlarda devamlı bir iş gibi görünmüyordu. Davy laboratuvarındaki bir patlama sonucu geçici olarak kör olunca Faraday birkaç gün onun yardımcılığını yaptı, arkasından da Davy'nin kitap formundaki kendi ders notlarını gönderip ondan sürekli bir iş rica etti. Davy'nin gururu okşansa da bir faydası olmadı – Kraliyet Enstitüsü'nde elemana ihtiyaç yoktu.

Derken talih Faraday'ın yüzüne güldü. Davy'nin asistanı bir kavgaya karışmış ve bu yüzden işten atılmıştı. Bu iş Faraday'a teklif

edildi. Faraday 1 Mart 1813'te 21 yaşında Kraliyet Enstitüsü'nde çalışmaya başladı. Davy pek çok açıdan ideal bir patron değildi. Ukalaydı, başka bilim insanlarının çalışmalarını kıskanır ve hafife alırdı, ayrıca çabuk sinirlenirdi. Faraday'ın işi ilk üç yıl Davy'nin uzun Avrupa yolculuklarında uşaklığını yapmaktı. Her ne kadar parası az (haftada 1 gine –ciltçilikten kazandığından daha az– ve Kraliyet Enstitüsü'ndeki çatı katında iki oda), süfli bir işse de Faraday büyük bilim insanlarıyla tanışıyor ve onlardan birini iş başında seyrediyordu. Bilimsel makaleler yayımlamaya başladı (1816), çeşitli gazları (klor dahil) sıvı haline getiren ilk kişi oldu (1823), 1824'te Kraliyet Cemiyeti'ne üye seçildi (o sırada Cemiyet'in başkanı olan Davy'nin muhalefetine rağmen), 1825'te ham petrolden ayırarak benzeni keşfetti. Aynı yıl, Kraliyet Enstitüsü'ndeki laboratuvarına müdür olarak atandı, bir yıl sonra da düzenli olarak cuma akşamları ders vermeye başladı, ki bu dersler kendi başına bir Viktorya dönemi enstitüsü haline geldi. Faraday'ın ünü ve başarısı Davy'yi geçmeye başlamıştı. Davy kendi çalışmasının, hamiliğini yaptığı birinin gölgesinde kalmasına bozuluyordu, fakat Davy 1829'da genç yaşta öldü. Faraday, o zamandan 1861'e, Prens Albert'ın ona bağışladığı Hampton Court'taki evine çekilene kadar Kraliyet Enstitüsü'yle neredeyse aynı anlama geliyordu. 1867'de 77. doğum gününden bir ay önce öldü. Şövalyelik nişanını ve Kraliyet Cemiyeti Başkanlığı'nı (iki kere!) reddederek emsalsiz bir rekor kırdı. "Entelektüel çabalar için ödül verilmesini hep aşağılayıcı bulmuşumdur; cemiyetlerin ya da akademilerin, hatta kralların ve imparatorların meseleye karışmaları bu aşağılamayı ortadan kaldırmıyor," demiştir.

Uzun meslek hayatında kazandığı pek çok somut başarının yanı sıra, Faraday'ın bilime en büyük katkısı elektrik ve manyetizmanın doğasını anlamamızı sağlaması olmuştur. Bu sadece ışığın nasıl hareket ettiğini kavramamıza yardımcı olmamış, aynı zamanda evrenin işleyişine yönelik modern anlayışın temelini oluşturan kuvvet alanı kavramını fiziğe kazandırmıştır.

Faraday'ın Alanları

Faraday'ın elektrik ve manyetizmayla ilgili ilk önemli araştırmaları daha 1821'de gerçekleştirilmişti. Önceki sene Kopenhag'da Hans Oersted bir telden geçen elektriğin, yanı başındaki küçük bir pusulanın "iğnesi"ni saptırdığına ilişkin şaşırtıcı keşfini ilan etmişti. Belli ki, telden geçen elektrik manyetik bir etki oluşturuyordu. Elektrik akımını ölçtüğümüz birimle adı ölümsüzleşen André Ampère, aynı yönde elektrik taşıyan iki paralel telin birbirini çektiğini, aksi yönde elektrik taşıyorlarsa birbirlerini ittiğini göstermişti. Daha önce karşımıza çıkan François Arago da, dönen bakır bir diskin, üzerine konan pusulanın iğnesini saptırdığını keşfetmişti.

Philosophical Magazine'in editörü Faraday'dan bu gizemleri araştırmasını ve okurlarına açıklamasını rica etti. Faraday bazı deneyler yapıp elektrik akımı taşıyan bir telin etrafında dairesel "manyetik kuvvet çizgileri" olduğu fikrini ortaya attı. Elektrik akımı taşıyan asılı bir telin sabit bir mıknatısın etrafında döndüğü ve asılı bir mıknatısın elektrik akımı taşıyan sabit bir telin etrafında manyetik alanın itim gücüyle döndüğü bir sistem tasarlayıp kurdu. Elektrik motorunun ve (daha sonra da) dinamonun, yani elektrik üretecinin temel prensibi budur. Madem elektrik manyetizmaya sebep oluyor, diye düşündü Faraday, o zaman manyetizmanın da elektrik üretebilmesi gerekir.

Bunu 1831'de ispatladı. "Elektromanyetik indüksiyon"un en doğrudan örneği, basit bir mıknatıs çubuk tel bobinin içine itildiğinde ya da içinden dışarı çekildiğinde meydana gelir. Mıknatıs hareket ettiği sürece telden elektrik akımı geçer. Faraday hem hareket eden elektrik akımının manyetizmayı yarattığını, hem de hareket eden manyetizmanın elektriği yarattığını kanıtladı. *Hareket eden* ifadesi burada çok önemlidir; ikinci etkiyi bulmada gecikmesinin sebebi Faraday'ın başlangıçta *sabit* bir manyetik alanın, yanı başındaki bir telde elektrik akımını indüklemesini bekliyor olmasıydı.[25]

25. Faraday'ın fikirlerinin nasıl başarılı bir şekilde modern bilimin bir parçası haline geldiğinin en belirgin göstergesi, daha sonra ortaya konmuş "alan" gibi terimler kullanmadan bu çalışmayı özetlemenin neredeyse imkânsız oluşudur.

Artık Arago'nun diskinin sırrını açıklayabilirdi: Bakır iletkenin hareketi mıknatısın etkisiyle diskte indüklenmiş bir akım yaratır ve bu akım da ("geribesleme" denilen sürecin erken örneklerinden birini teşkil ederek) manyetik etki yaratıp mıknatısı saptırır. Aynı temanın çeşitlemesi olarak büyük bir mıknatısın kutupları arasında dönen bakır bir disk ve biri merkezde, öteki kenarda diskin yüzeyini fırçalayan iki telle Faraday Ekim 1831'de ilk elektrik jeneratörünü imal etti.

Faraday bu fenomenleri açıklamak için uzun uzun kafa yoruyordu. Matematikçi değildi, fakat kafasında resmedebilmek gibi müthiş bir yeteneği vardı. Neticede devrim yaratacak bir fikirle çıkageldi. Evreni dolduran ve birbirine çarpıp duran minik nesnelerin etkileşimi aracılığıyla etkileri mekanik olarak ileten maddi bir esir ya da *plenum* yerine, elektrik ve manyetik kuvvetler, hatta kütle çekimi, boş uzaya yayılıp birbirleriyle etkileşen "kuvvet çizgileri" olarak tanımlanabilirdi. Atomları minik, içi açılamaz katı kütleler olarak görmek yerine, onlara kuvvetlerin yoğunlaşma merkezi olarak bakmamız gerekiyordu – ne eksik, ne fazla.

Kuvvet çizgileri kavramını, okulda yapılan deneylerde kâğıdın altına tutulan mıknatısla kâğıdın üzerindeki demir talaşların saçılışını gören herkes bilir. Demir talaşlar gerçekten de mıknatısın iki kutbu arasında yay çizerek dizilirler. Ama bu Viktorya Britanyası için olağanüstü bir fikirdi, özellikle de doğanın bilinen *bütün* güçlerine uygulandığında. Faraday Kraliyet Enstitüsü'nde ilki 1844'te, ikincisi 1846'da olmak üzere iki konferans vermeden önce uzun uzun düşündü. Anlaşılan o ki, ikinci konferans önceden planlanmamıştı – o gün bir konferans verecek olan Charles Wheatstone sahne korkusu yüzünden son dakikada kaçmış, Faraday'a da boşluğu doldurmaktan başka seçenek kalmamıştı. Faraday, Wheatstone'un yapacağını umduğu konuşmanın özetini verdikten sonra elinde zaman da olunca kuvvet çizgileriyle ilgili fikirlerini hazırlıksız anlatmaya başladı.

Faraday, klasik bir "düşünce deneyi" örneğiyle insanlardan güneşin uzayda tek başına oturduğunu hayal etmelerini istedi. Dünya

Bugün alanları "herkes biliyor" ve kuvvet çizgileri artık pratik aklın kapsamında – tıpkı önceki nesillerde esirin pratik aklın kapsamında olması gibi.

bir sihirle aniden şu anki yerine yerleştirilse ne olurdu? Güneşin orada olduğunu nasıl "bilecekti"? Faraday'ın savına göre, dünya daha yerine konmadan önce bile, güneşin etkisi kütle çekimi kuvvet çizgileri biçiminde uzaya yayılacaktı. Faraday, dünyanın güneşin kütle çekim alanına tepkisinin uzaktaki güneşin kendisine değil, *dünyanın yerel alanındaki* kuvvet çizgilerinin varlığına verdiği bir tepki olduğunu söylüyordu. Dünya açısından kuvvet çizgileri (alan) gerçektir. Aynı şekilde, manyetik ve elektrik çizgilerinin de evrende kendi yollarını çizdiğini ileri sürüyordu. Şimdiki adıyla bu alanlar gerçekti ve maddenin kendisi –atomlar– bu alanların yoğunlaştığı yerlerden ibaretti.

Faraday 1846'daki konferansında daha da ileri gitti. Işığın elektrik kuvvet çizgileri olarak açıklanabileceğini ileri sürdü. Zaten o zamana kadar ışığın bir tür dalga –titreşim– olduğu gayet iyi biliniyordu. Faraday bu fikri ışığın nasıl hareket ettiğini bütünüyle açıklayacak bir hale dönüştürmek için gereken matematik bilgisinden yoksundu. Fakat, 1846 konferansındaki bu fikirler birkaç yıl sonra yayımlandığında söylediği gibi, neler olup bittiğinin fiziksel resmi kafasında netti: "Büyük bir cüretle ortaya koyduğum fikre göre, ışıma, parçacıkları ve aynı zamanda madde kütlelerini birbirine bağladığı bilinen kuvvet çizgilerindeki yüksek bir cins titreşimdir. Bu fikir esirden kurtulma gayretindedir, titreşimlerden değil."[26]

Işıkta meydana gelen titreşimlerin sayısının ne kadar "yüksek" olduğu birkaç yıl sonra başka bir 19. yüzyıl bilim insanı olan John Tyndall'ın hoş bir kitabında resmedildi. Tyndall ışık hızının çok büyük olduğunu, 300 000 km uzunluğundaki bir ışık "sütun"unun her saniye gözümüze girdiğini ve (mesela) kırmızı ışığın dalga boyunun çok kısa olduğunu, o uzunluktaki bir kırmızı ışıkta, yuvarlak rakamlarla, 200 trilyon halkacığın bulunduğunu ve gözünüzde görme duyusunu yaratmak için hepsinin her saniye etkileşim içinde olduğunu söylüyordu.[27]

Faraday'ın bu dalgaların doğasını algılayış biçimi sonraki yirmi sene içinde Maxwell'in çalışmasıyla doğrulandı. Maxwell daha

26. Michael Faraday, *Experimental Researches in Electricity, Vol II*, Londra: Taylor & Francis, 1855, s. 451.

27. Tyndall, *On Light*, s. 63; rakamları modern hale getirdim.

sonra elektrik ve manyetik alanların titreşimlerini 1864'te, Faraday ölmeden üç yıl önce, yayımladığı dört denklemle açıklamıştır.

Sihrin Renkleri

Maxwell'in geçmişi Faraday'ınkinden çok farklıydı. Newton'la Einstein arasındaki dönemin en büyük kuramsal fizikçisiydi ve 18. yüzyılın seçkin İskoçyalı ailelerinden olan Penicuik'li Clerk ailesinden geliyordu. 18. yüzyılda Clerk ailesiyle başka varlıklı bir aile olan Middlebie'li Maxwell ailesi arasında iki evlilik olmuştu; James'in babası John Clerk, İskoçya'nın güney batısında yer alan Galloway bölgesindeki Dalbeattie kasabası yakınlarında bulunan 1500 İngiliz dönümü büyüklüğündeki çiftlik arazisiyle Middlebie malikanesini miras yoluyla alınca, Maxwell adını aldı. John Clerk Maxwell avukattı, fakat bilime karşı büyük ilgisi vardı ve Edinburgh Kraliyet Cemiyeti'nin bir üyesiydi. Yani James hem güvenli, hem konforlu, hem de bilim dünyasıyla erken yaşta tanışmasını sağlayan bir aileden geliyordu.

Maxwell 1831'de Edinburgh'da doğdu, annesi loğusalık döneminde en iyi tıbbi bakımı alabilsin diye anne babası burada kalmıştı. Fakat Maxwell hayatının ilk on yılını Galloway'deki malikanede, Glenlair House'da geçirdi. Evin tek çocuğuydu, okumayı annesi öğretti, ilk eğitimine de nezaret etti, fakat Maxwell sekiz yaşındayken annesi 48 yaşında öldü. O günlerde Dalbeattie daha da ücra bir köşeydi. 1846'da trenyolu gelene kadar Glasgow'a gitmek bir gün sürüyordu ve 1837'de Glasgow-Edinburgh hattı açılana kadar Edinburgh'a gitmek de iki gün sürüyordu. Maxwell'in yakın akranları yoktu, annesinin ölümüyle yaşadığı travma yetmiyormuş gibi sonraki iki yılda eğitim hakkında eski moda görüşleri olan ve Latinceyi ezbere öğrenmenin önemine inanan bir özel öğretmenin eline düştü. Daha sonra Edinburgh Akademisi'ne gönderildi. Şehirdeyken Edinburgh'daki iki halasından biriyle oturuyor, tatillerde de Glenlair'deki evine dönüyordu.

Galloway'li çocuğun akademide okul arkadaşları üzerinde bıraktığı ilk etki hiç de dâhi olma yolundaki birinin etkisi değildi. Köylü şivesi vardı, giysileri şehirli çocuklarınkinden farklıydı, aklıselimden ziyade pratik becerilere sahip olan babasının tasarlayıp

imal ettiği ayakkabıları giyiyordu. Maxwell okuldaki ilk günün sonunda halasının evine yara bere içinde, üstü başı parçalanmış bir halde döndü. Bir de yeni lakabı vardı: "Alık". Bu lakap akademi boyunca üstüne yapışıp kaldı, ama tabii lakabının zekâsına değil de tuhaflığına yönelik olduğu açıktı.

Bu talihsiz başlangıca rağmen Maxwell okulda iyiydi. Birkaç yıl sonra bir parça sicimle bir oval (bazı biyografilerde geçtiği gibi elips değil) çizme yolu tasarlayarak matematikteki kabiliyetini gösterdi. Babasının Edinburgh'daki bilim camiasıyla olan bağlantıları sayesinde, Maxwell'in bu keşfi 14 yaşındayken ilk bilimsel makalesi olarak yayımlandı. Doğruyu söylemek gerekirse dünyayı sarsacak bir keşif değildi bu – fakat Maxwell'i erken yaşta Edinburgh' daki bilim camiasıyla tanıştırmış oldu.

1847'de 16 yaşındayken (o sıralarda İskoçya'da üniversiteye girme yaşı) Maxwell Edinburgh Üniversitesi'ne geçti. Ne var ki, dört yıllık programın üç yılını tamamladıktan sonra Cambridge'e geçip 1854'te matematik bölümünü bitirdi. 1856'da Aberdeen'deki Marischal College'da Doğa Felsefesi profesörü oldu, fakat bu okul 1860'ta King's College'la birleşip Aberdeen Üniversitesi olduğunda iki doğa felsefesi profesöründen birinin görevi bırakması gerekiyordu. Maxwell Marischal College'ın müdürünün kızıyla evli olmasına rağmen daha küçük olduğu için işini kaybetti. Beş yıl Londra'daki King's College'da kaldı, fakat 1865'te babası ölünce İskoçya'daki ailesinin evine döndü. Altı yıl boyunca orada soylu bir çiftçi ve amatör bir bilim insanı olarak kaldı (fırsattan istifade elektrik ve manyetizma hakkındaki büyük eserini burada kitap formuna getirdi), fakat 1871'de tekrar Cambridge'e dönüp Cambridge Üniversitesi'nde ilk deneysel fizik profesörü ve Cavendish Laboratuvarı' nın ilk müdürü olmaya ikna edildi. Burayı bilimin en seçkin merkezlerinden biri haline getirmede önemli rol oynadı. Ne var ki 1879' da, annesinin öldüğü yaşta ve aynı hastalıktan, kanserden öldü.

Maxwell'in ilgi alanı 19. yüzyıl fiziğinin geniş bir bölümünü kapsıyordu. Bunların içinde, gazların kinetik kuramı, ısı ve termodinamik, Satürn'ün halkalarının yapısı ve kararlılığı, moleküllerin büyüklüğünün doğru tahmini ve başka katkılar da vardı. Fakat yeni ufuklar açan çalışması ışığın ve rengin doğası üzerineydi. İlk müthiş keşfi bilimden çok sihre benziyordu. Siyah beyaz resimlerden

nasıl renkli fotoğraflar yapılacağını gösteriyordu – insansız uzay araçlarının, başka şeylerin yanı sıra Satürn'den ve güneş sisteminin diğer uzak köşelerinden renkli resimler gönderirken bugün de hâlâ kullandığı bir yöntem. Böyle araçlar Satürn'ün halkalarının resmini dünyaya gönderirken, Maxwell'in açıkladığı halka sisteminin resimlerini elde etmek için onun icat ettiği bir renkli fotoğraf tekniğini kullanıyorlar; sinyaller dünyaya, özelliklerini yine Maxwell'in açıkladığı (aslında radyo söz konusuyken tahmin ettiği demek gerekir) elektromanyetik tayfın parçası olan radyo dalgaları olarak gönderiliyor. Gerçekten bir sihir!

Maxwell renkli fotoğrafı, Young'ın renkli görünümün, her biri ana renklerden –kırmızı, yeşil ve mavi– birine duyarlı olan gözdeki üç tür alıcı sinirle mümkün olduğu fikrinden geliştirerek icat etmiştir (Young'ın kuramı başka şeylerin yanı sıra renk körlüğünü, bu sorunun alıcı sinirlerin bir ya da daha fazlasının çalışmaması sonucu ortaya çıktığını gayet net açıklar). Maxwell farklı renklerin etkileşimlerini 1849'da Edinburgh Üniversitesi'nde James Forbes'un laboratuvarında çalışırken incelemeye başladı. Forbes Maxwell'i genç öğrenci üniversiteye gelmeden önce tanıyordu – kendisi doğa felsefesi profesörüydü ve Maxwell'in babasının, oğlunun ovallerle ilgili tezini gösterdiği kişiydi. Daha sonra bu yazının *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*'da yayımlanması sağlanmıştı. Forbes'la Maxwell araştırmalarında dönen renkli diskler kullanmıştı – diski her biri farklı renge boyanmış dilimlere ayırmış ve renklerin birleşiminin gözde ne etki bıraktığını görmek için döndürmüşlerdi.

Forbes ciddi bir hastalıktan dolayı deneylerini bırakmak zorunda kaldı, Maxwell de çok geçmeden Edinburgh'dan ayrıldı; fakat 1854'te Cambridge'den mezun olduktan sonra deneylere tekrar başladı. Üç ana renk kullanılarak nasıl farklı renkler elde edilebileceğini gösterdi. Daha sonra, güneş ışığından ayrıştırdığı üç ana rengi farklı kombinasyonlarda yeniden bir araya getirerek istenilen rengin elde edilmesini sağlayan "renk kutusu" adını verdiği şeyi icat etti.

Maxwell 1861'de Kraliyet Enstitüsü'nde ilk renkli fotoğrafı hayranlık içindeki bir izleyici kitlesine (Faraday da dahil) yansıttığında çalışmasının bu yanı zirveye ulaştı. Bu resim bütün renkli fotoğrafların ve renkli televizyondaki işlemin öncüsüydü. Maxwell, ekose bir kurdelenin üç ayrı fotoğrafını çekti. Birini kırmızı, birini

mavi, birini de yeşil filtre kullanarak. Her filtre sadece tek bir renk ışık yayıyordu. Dolayısıyla her fotoğraf plakası tek bir ışık rengine karşılık gelen bilgiyi –açık-koyu örüntüsü– taşıyordu. Fakat her fotoğraf aslında siyah beyaz bir resimden ibaretti – aynı kurdelenin üç farklı siyah beyaz resmi, her birinin açık-koyu oranı farklıydı fakat hiçbirinde bir zerrecik renk yoktu.

Maxwell bu üç fotoğraf plakasını üç resmin birbiriyle tam örtüşmesine özen göstererek aynı anda bir perdeye yansıttı. Resimler her seferinde bir renk olarak, kırmızı, yeşil ya da mavi olarak yansıtılabiliyordu. Dolayısıyla perdede ortaya çıkan resim kırmızı, mavi ve yeşil ışığın bir karışımı olabilirdi; fakat sonuç, kurdeleden yansıyan ışıktaki karışımla tamamen aynıydı. Üç resmin örtüşmesinden oluşan resim ekose kurdelenin bütün renklerini açık seçik gösterdi. Böylece insanın renk algısının sadece üç ana rengi kullandığı ispat edilmiş oldu.

Uzaktaki bir uzay araştırma aracı üç filtreyle üç resim çekerek temelde aynı hileyi yapar. Her resimden aldığı verileri (açık-koyu oranları hakkındaki bilgiler) dünyaya radyo dalgalarıyla gönderir. Burada bilgisayar aracılığıyla üç resim bir araya getirilip renkli resim elde edilir. Televizyonunuz da aynı numarayı yapar, çünkü ekran her biri üç minik noktadan oluşan öbeklerle kaplıdır. Her nokta ana renklerden birinin ışığını verebilecek şekildedir. Renkli resim üç rengin doğru oranlarda birleşiminin tetiklenip ekranda doğru renkli açık-koyu desenin oluşmasıyla görülür.

Maxwell'in Kraliyet Enstitüsü'ndeki gösterisi zafer getirdiyse de, aslında bunu o sırada farkında olmadığı kadar sihre borçluydu. Her ne kadar olayın görgü tanıklarının anlattıkları gerçekten renkli bir resmin ekranda göründüğünü şüphe götürmez şekilde ortaya koysa da, yıllar sonra fotoğrafçılar, gösteride kullanılan fotoğraf plakalarındaki kimyasal maddelerin kırmızı ışığa duyarlı olamayacağını fark ettiler. Bu muamma 1960'larda ABD'deki Kodak Laboratuvarları'ndaki araştırmacılar tarafından çözüldü. Maxwell'in ekose kurdelesindeki kırmızı rengin aynı zamanda mor ötesi (gözle görünmeyen) ışığı da yansıttığını, ayrıca, tamamen tesadüfen, kullandığı kırmızı filtrenin mor ötesi ışığı da geçirdiğini keşfettiler. Maxwell'in gösterisindeki kırmızı plakanın üzerindeki açık-koyu örüntüsü aslında mor ötesi ışığın yarattığı örüntüydü, fakat bu çifte te-

sadüf sayesinde, plakanın kırmızı ışığa duyarlı olması durumunda kırmızı ışığın yaratmış olacağı örüntünün aynısı ortaya çıkmıştı.

Maxwell'in kullandığı orijinal plakaların korunduğu Cambridge'de 1961 yılında, Maxwell'in bunu gerçekleştirmesinden yüz yıl sonra, Kraliyet Enstitüsü'ndeki orijinal gösteri yeniden canlandırıldı. Bu üç plaka yine ekose kurdelenin tam renkli resmini verdi, tabii artık bütün gözlemciler resmin "kırmızı" bileşeninin şans eseri olduğunu biliyorlardı. Maxwell'in sihri, en azından bu örnekte, sadece siyah beyaz fotoğraflarla kırmızı, yeşil ve mavi ışığı kullanarak tam renkli resimler etmekten ibaret değildi, aynı zamanda (kısmen) yanlış sebeple doğru cevabı bulmasıydı. Ne var ki, bilime yaptığı en büyük katkıda hiç kuşkusuz doğru sebeple doğru cevabı bulmuştur – fakat bu öyle bir cevaptır ki, sonraki kuşak fizikçilerin kafa yorması için geriye çok şey bırakmıştır.

Maxwell'in Akılları Durduran Denklemleri

Maxwell elektrik ve manyetizma hakkındaki asıl araştırmasına 1854'te Cambridge Üniversitesi'nden mezun olduktan hemen sonra başladı. Son on yıl içinde William Thomson (1824-1907 yılları arasında yaşamış ve 1892'de Lord Kelvin olmuştur) katılardaki ısı akışı ile bir bölgedeki elektrik kuvvetleri arasında matematiksel bir analoji keşfetmişti. Bu keşif Maxwell'in büyük ilgisini çekti ve o da bu türden başka analojiler aramaya başladı. Bir dizi mektupla Thomson'la fikir alışverişinde bulundular. Elektrik ve manyetizma üzerine yazılmış ilk eseri 1850'lerin ortalarında basıldı; bu çalışma Faraday'ın kuvvet çizgileriyle sıkıştırılamaz bir akışkanın "akış çizgileri" arasındaki analojiyi geliştiriyordu.

Elektriğin katılardaki ısı ya da bir sıvının akışı gibi birbirinden farklı şeyleri tanımlayan denklemlere benzer denklemlerle tanımlanabilmesi, elektriğin gerçekten de bunlardan biri "gibi" olduğu anlamına gelmemelidir, diyordu Maxwell – analojiler tamamen matematik açısındandı, "ilişkiler arasındaki bir benzerlik[ti] bu, ilişkili şeyler arasındaki bir benzerlik değil".[28] Aynı tür denklemler ısının, suyun ve elektriğin hareketini açıklıyor olabilir – fakat bu, ne elek-

28. Aktaran Everitt, *James Clerk Maxwell*, s. 88.

triğin su "olduğu" anlamına gelir, ne de suyun ısı "olduğu" anlamına.

Sonraki on yılda Maxwell elektrikle akışkanların akışı arasındaki analojiyi geliştirdi. Şimdi bakıldığında tuhaf gözüken bir tablo çizdi. Buna göre, maddi nesnelerin arasındaki bütün boşluğu dolduran bir sıvı –esir– içinde dönüp duran girdapların etkileşimi sonucu taşınan elektrik ve manyetizma kuvvetleri söz konusuydu. Faraday'ın esire ihtiyaç olmadığı ve önemli olanın kuvvetlerin kendisinin –alanların– olduğu içgörüsünden sonra bazı açılardan bir geri adımdı bu. Fakat Maxwell'in o yıllarda kabul ettiği fiziksel tablo, türettiği denklemler kadar önemli değildi. Aynı matematik işlemleri, suyla ısı arasındaki analojide olduğu gibi farklı fiziksel sistemleri tarif edebiliyordu; Maxwell'in denklemleri de, akla nasıl bir resim getirirse getirsin, elektrik yüklü ya da manyetik nesneler arasındaki kuvvetlerin nasıl işlediğini doğru tarif ediyordu – *tabii* girdap ortamının (esirin) özellikleri doğru seçildiği takdirde.

Bir sonraki hayal gücü sıçraması, bu girdap ortamının, şayet elastikse, sıkıştırılması ya da esnetilmesi durumunda ne olacağını düşünmekti. Dalgaların elastik bir ortamdan geçebileceği açıktır. Bu dalgaların hareket hızı ortamın özelliklerine bağlıdır. Maxwell 1862'de, elektrik ve manyetizma kuvvetlerinin açıklanması için gereken özelliklerin seçimiyle, ortamın ışık hızında dalga yayacağını keşfetti. Heyecanı o yıl yayımlanan bir makaledeki sözlerinden belli oluyordu. İtalikler Maxwell'in kendisine ait: "*Işığın, elektrik ve manyetizma olaylarının sebebi olan aynı ortamın enine dalgalanmalarından ibaret olduğu* sonucunu çıkarmaktan kaçmak pek mümkün değil."[29]

Elektromanyetik olayların ve ışığın matematiksel açıklamasını geliştirmek için daha yapılacak çok şey vardı. Maxwell girdap kuramı kavramını tümden terk edebileceğini ve bilinen bütün elektrik ve manyetik olayları 1864'te yayımlanmış olan bir çalışmasının (*A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*) başlığındaki gibi, yani elektromanyetik alanın dinamik kuramı çerçevesinde açıklayabileceğini keşfetti. Kuram, elektrik ve manyetizmaya dair söylenebilecek her şeyi, şimdi Maxwell denklemleri diye bilinen dört denklem grubunda özetliyordu. Belli büyüklükte, belli bir mesafe-

29. *On Physical Lines of Force*, aktaran Everitt, *James Clerk Maxwell*, s. 99.

de bulunan iki elektrik yükünün birbirini çekme kuvvetini bulmak isterseniz, cevap Maxwell denklemlerini çözerek ortaya çıkar. Hareket eden belli bir mıknatısın ürettiği elektrik akımının gücünü bilmek isterseniz, cevap Maxwell denklemlerini çözünce bulunabilir. Elektrik ve manyetizmayla ilgili her problem (bir sonraki bölümde ele alınan bazı kuantum etkileri hariç) Maxwell denklemleri kullanılarak çözülebilir; bu denklemler Newton zamanından bu yana bilimde atılan en büyük ileri adımı temsil ediyordu. Denklemler belli bir sayıyı, elektromanyetik dalgaların hareket etme hızına karşılık gelen ve daima *c* olarak yazılan bir sabiti de içeriyordu.

c değeri duran ya da telde hareket eden yüklerin elektrik ve manyetik özelliklerini ölçen deneylerle bulunmuştur. Sadece elektrik ve manyetizma çalışmaları sonucu elde edilen bir sayıdır. Maxwell'in kendisinin dediği gibi, "deneydeki ışık sadece aletleri görmede kullanılmıştır." *c* değeri olarak deneylerden elde edilen sayı ışık hızının ta kendisidir:

> Bu hız ışık hızına o kadar yakın ki, ışığın kendisinin (ışımayla yayılan ısı ve başka ışımalar da dahil) elektromanyetik yasalara göre elektromanyetik alan içinde dalga formunda yayılan bir elektromanyetik bozanetken (*disturbance*) olduğuna dair elimizde güçlü bir delil var gibi görünüyor.[30]

Maxwell gördüğümüz ışık dışında başka elektromanyetik dalga biçimleri olabileceğini fark etmişti – şimdi kızılötesi ışıma diye bildiğimiz ısı ve radyo dalgaları olarak bildiğimiz "başka ışımalar" da dahil. Başka elektromanyetik ışıma biçimlerinin var olduğu tahmini 1880'de Heinrich Hertz dikey tellerden bir aşağı bir yukarı gidip gelen elektrik akımlarını kullanarak uzun dalga elektromanyetik ışıma üretip hızını ölçünce doğrulandı. Bu radyo dalgaları gerçekten de Maxwell'in tahmin ettiği gibi ışık hızıyla hareket ediyordu, ayrıca ışık gibi uygun deney düzeneklerinde kırılması, yansıması ve kırınması mümkündü.

Maxwell denklemlerinin modern yorumlarında esir ve girdapların yerini, Faraday'ın kuvvet çizgileri, yani elektromanyetik alanı aldı. Tabii bu, sahnedeki en son zihinsel resim; elektron açısından "gerçeğin" ne olduğuna dair Faraday'dan, Maxwell'den ya da bir

30. İkisini de Maxwell'in 1864 makalesinden aktaran Baierlein, *Newton to Einstein*, s. 122.

başkasından daha iyi bir fikrimiz yok. Alan kuramının avantajı basitliğidir, ayrıca matematiğin işleyişini de açık seçik gösterir. Fakat modelleri daima, hayal gücümüze yardım eden, neler olup bittiğini gözümüzde canlandırmayı (ya da hesaplamayı) sağlayan bir şey olarak görmeliyiz. Gerçeklik, matematik denklemlerinin kendisindedir, denklemler ister elektromanyetik dalgalarını, ister katılardaki ısıyı, ister suyun akışını tarif etmek için kullanılsın. Denklemler bize bir sistemin belli bir şekilde bozanetkene maruz kaldığında nasıl değişeceğini doğru olarak söylediği sürece, kuvvetlerin işbaşındaki etkileşimini gözünüzde nasıl canlandırdığınız önemli değildir.

Ama yine de çoğu insan neler olup bittiğini gözünde canlandırmak için analojilere ve modellere ihtiyaç duyar. Işığın hareket etme biçiminin en basit zihinsel resmi, bir sicimin dalgalanma şeklidir. Hareket halindeki manyetik alanın elektrik alanı oluşturduğunu ve değişen elektrik alanının bir manyetik alan yarattığını hatırlayalım. İki dalgayı aynı fazda hareket ederken düşünün, tıpkı gerilmiş bir sicimin bir ucunu salladığınızda sicim boyunca elde edeceğiniz dalgacıklar gibi. Elektrik dalgacıklarının dikey hareket ettiğini varsayalım, ip boyunca bir aşağı bir yukarı; o zaman, manyetik dalgacıklar yan yana hareket eder, elektrik dalgacıklarına dik açıyla soldan sağa. Sicimin herhangi bir noktasında elektrik alanının gücü dalgacıklar geçtikçe sürekli değişir. Değişen elektrik alanı, değişen manyetik alan yaratır. Bu yüzden sicim boyunca her noktada dalgacıklar geçtikçe manyetik alan sürekli değişir. Değişen manyetik alan değişen elektrik alanı yaratır. Değişen iki alan birbirinin müsebbibi olarak bir ışık demeti halinde ışık kaynağından yayılan enerjinin etkisiyle el ele yürürler.

Ne var ki 1864'te bu net resmin tesis edilme ihtimali çok uzaktı. 1878'de bile Maxwell *Encyclopaedia Britannica*'daki bir makalede hâlâ esir fikrini yaymaya çalışıyordu: "Esirin içeriğine ilişkin tutarlı bir fikir oluşturmada ne kadar güçlük çekersek çekelim, gezegenlerarası ya da yıldızlararası boşluklar fiziksel bir madde ya da kütleyle kaplıdır."[31]

Maxwell öldüğünde, kuramı çoktan geniş bir destek kazanmıştı, fakat ışık "kuramı" olarak tesis edilmesi ancak on yıl sonra rad-

31. Bkz. Zajonc, *Catching the Light*, s. 146.

yo dalgalarının incelenmesiyle gerçekten mümkün oldu. Esirin ölüm fermanını okuyan çalışma (kısmen *Encyclopaedia Britannica*'daki 1878 makalesinden esinlenerek) 1880'lerde gerçekleşti. Ne var ki, bu çalışmanın önemi 20. yüzyılın başlarından sonra anlaşılacaktı. Maxwell'in denklemindeki sabit sayı *c*'nin gerçek önemini dünyaya açıklayacak ve bu can alıcı deneyleri doğru açıdan değerlendirecek olan kişiye gelince, Maxwell Kasım 1879'da öldüğünde daha sekiz aylık bile değildi. Bu kişi Albert Einstein'dı ve onun sahneye çıkışı fiziğin modern zamanlarına doğru bir adıma işaret ediyordu.

İkinci Bölüm

Modern Zamanlar

Isaac Newton hareketin göreliliğini biliyordu, 19. yüzyıl fizikçileri de biliyordu. Yörüngesindeki ay dünyaya göreli hareket eder, dünya da güneşe göreli hareket eder. Arabanızla düz bir yolda saatte 50 km yapıp ben bisikletimle aynı yönde saatte 15 km hızla giderken beni sollarsanız, o zaman bana göre saatte 35 km hızla hareket ediyorsunuz demektir. Maxwell'in denklemleri ışık hızı için tam bir değer sağladığında, o dönemin fizikçilerinin bunun, ışığı yaydığı düşünülen esire göre ışık hızı olduğunu varsaymaları doğaldı. Öte yandan, dünya güneşin etrafında kabaca dairesel bir yörüngede hareket ettiğinden, dünya her zaman esire göre aynı hızda hareket ediyor olamaz. Bazen bir yönde, altı ay sonraysa yörüngesinin öteki tarafında ters yönde hareket eder. Hareketin göreliliği hakkındaki Newtoncu fikirlerle, ışığın esir içinde yayılan bir elektromanyetik dalga olduğu fikrinin birleşmesi doğal olarak insanları ışık hızının yılın farklı zamanlarında *dünyaya göre* farklı olduğu sonucuna götürdü.

Bazı astronomlar yılın farklı zamanlarında yıldızlardan ve gezegenlerden dünyaya ulaşan ışığı inceleyerek bu farkı tespit etmeye çalıştılarsa da başarılı olamadılar. Oysa dünya içinde deneyler yaparak da bu etkiyi ölçmenin bir yolu vardır. Bir ışık demeti dünyayla aynı yönde hareket ettiğinde, onu sollamaya çalışmamız gerekir, öyle ki neticede ışık bizim ölçme cihazlarımıza göre bir parça daha az hızlı hareket eder. Fakat dünyanın hareket yönünün enine, dik açıyla hareket eden bir ışık demetinin Maxwell deneylerinin belirlediği ışık hızı *c*'ye tamı tamına sahip olduğunu ölçmemiz gerekir.

Tabii dünyanın hareketinin etkisi ışık hızıyla kıyaslandığında küçüktür. Işık (yuvarlak hesapla) saniyede 300 000 km hızla hare-

ket eder, halbuki dünyanın yörünge hızı saniyede 30 km'nin hemen altındadır – yuvarlak bir hesapla, ışık hızının yüzde 0.01'i. Maxwell *Encyclopaedia Britannica*'da esir üzerine yazdığı makalede ölçümleri yapmak için ışığın kendisini kullanarak dünyanın esire göre hızının nasıl ölçüleceğini gösterdi. İlke olarak bir ışık demetini ikiye ayırıp bu iki demetin her birini çift ayna arasında sektirerek bir "yolculuğa" göndermek mümkündü. Işık demetlerinden biri dünyayla aynı yönde, ötekiyse dünyayla dik açı yaparak iki ayna arasında yolculuk edecekti. Sonra bu iki ışık demeti bir araya getirilip tıpkı Young'ın deneyindeki iki delikten gelen ışık gibi girişim yapmaları sağlanabilirdi. İki ışık demetinin dünyaya göre az da olsa farklı hızlarda hareket ediyor olması gerekirdi. Yani, deney ışık demetlerinin aynı mesafede yolculuk. etmeleri sağlanacak şekilde özenle düzenlenirse demetler aynı fazdan ayrılarak girişim saçakları oluşturacaklardı. Girişim saçaklarının aralıkları dünyanın esire göre tam olarak ne kadar hızla hareket ettiğini ortaya koyacaktı. Ne var ki, Maxwell bu etkinin tespit edilemeyecek kadar çok küçük olacağı sonucuna varmıştı. Fakat bu zorlu iş neredeyse hiç vakit kaybetmeden Amerikalı genç bir araştırmacı tarafından göğüslendi.

Esirin Ölümü

Albert Michelson aslında 1852'de Almanya'da doğmuş, fakat o çocukken ailesi ABD'ye göç etmişti. 1873'te Annapolis'teki ABD Deniz Akademisi'nden mezun oldu ve akademide öğretim kadrosuna atanana kadar iki yılını denizde geçirdi. Fizik ve kimya dersleri verirken görevlerinden biri akademideki öğrencilere ışık hızının nasıl ölçülebileceğini göstermekti. Zamanın standart deneyinin sonuçları onu tatmin etmediğinden deneyi ilerletmek için kolları sıvadı. Bunun için daha hassas bir deney geliştirdi. Bu çalışmada geliştirdiği beceriler Maxwell'in *Encyclopaedia Britannica* makalesinde dile getirdiği zorluğa meydan okuyup, interferometre kullanarak dünyanın esirdeki hareketini ölçme işini ele alacağı anlamına geliyordu; bunun sonucunda bir ömür boyu süren çalışmasında daha iyi interferometreler üretip bunlarla ışık demetleri yardımıyla gitgide daha hassas ölçümler yaptı.

Michelson'ın ışık hızını ölçmek için kullandığı yöntem, dönen aynalardan yansıyan ışık demetlerine dayanıyordu. Bu tekniğin öncüsü 1819-68 yılları arasında yaşamış olan Fransız Jean Foucault' ydu. Foucault aynı zamanda jiroskobu da keşfetmiş ve meşhur sarkacını kullanarak dünyanın döndüğünü göstermişti. Işık hızını ölçerken çok hızlı dönen düz bir aynadan seken ışık demetlerini kullanıyordu. Yansıyan ışık demeti başka bir aynadan sekip tekrar ilk aynaya dönüyordu. Fakat bu arada ilk ayna biraz hareket etmiş oluyordu. Aynanın dönüşünden dolayı ışık demetinin sapma açısı, ışık demetinin ikinci aynaya gidip geri dönmesinin ne kadar zaman aldığını ortaya koyuyordu.

Foucault bu tekniği 1850'de ilk defa ışığın suda, havada olduğundan daha yavaş hareket ettiğini göstermek için kullanmıştı. Böylece ışığın dalga olduğunu doğrulamış oluyordu. 1862'de bu tekniği, ışık hızını en iyi modern ölçümlerin yüzde biri hata payıyla 298 000 km/sn olarak ölçecek kadar geliştirmişti.

Michelson bu tekniği ayna sayısını artırıp ışık demetinin kat ettiği yolu uzatarak daha da geliştirdi. Işık demetini saptırmak için, dönen sekizgen bir ayna düzeneği kullandı (daha sonra bu rakam artacaktı). Tambur biçimindeki sekizgen ayna düzeneği bilinen bir hızla dönerken, sekiz aynanın her biri tamı tamına bilinen aralıklarla ışığı yansıtacağı konuma geçiyordu. Michelson, uygun yansımaları elde edene kadar tamburun hızını ayarlayıp, bir yüzünden ışığı sektirip başka bir yüzüne tekrar çarptırarak ışığın ne kadar yol kat ettiğini bulabiliyordu.

Bu deneyin 1926'da Michelson 73 yaşındayken yapılmış nihai şeklinde ışığın kat ettiği yol Kaliforniya'daki iki dağın zirvesi arasındaki 70 km'lik gidiş geliş mesafesiydi; Michelson'ın ışık hızı için 1926'da bulduğu rakam 299796.5 ±4 km/sn idi. Deneysel belirsizlikler çerçevesi içindeki bu değer, bugün kabul edilmiş olan 299792.5 km/sn değerine uymaktadır. O yaşta neden *c*'yi o kadar hassas ölçmeyi dert ettiği sorulduğunda şu cevabı vermişti: "Çünkü çok eğlenceli bir şey."[32] Michelson 1931'de 79 yaşında ışık hızının daha da hassas bir ölçümünü planlayıp eğlenirken öldü.

1890'ların başlarında Michelson, meslektaşı Edward Morley'y-

32. Aktaran Weber, *Pioneers of Science*, s. 33.

le Paris'teki standart metreyi renk tayfının kırmızı tarafındaki saf ışığın dalga boyu cinsinden hesaplamıştı; zamanlarının çok ötesindeydiler. 1960'ta metrenin boyunu ışığın özellikleri cinsinden tanımlamak için temelde bu aynı teknik resmi olarak kabul edildi. Bu alandaki öncü çabaları, ışık hızı ölçümleri ve hassas optik aletler yaratmasından dolayı Michelson 1907'de fizik ödülünü alarak Nobel alan ilk Amerikalı oldu. Fakat adı en çok 1880'lerin ikinci yarısında Morley'yle yaptığı deneyle hatırlanır.

1880'de Michelson sözde geçici bir süre için izin alarak Annapolis'ten ayrılıp çalışmak üzere Avrupa'ya, Berlin'e, Heidelberg ve Paris'e gitti. Michelson tabii Maxwell'in *Encyclopaedia Britannica*'daki esir makalesini okumuştu ve dünyanın esire göre olan hızını ilk ölçme denemesi 1881'de Berlin'deki Hermann Helmholtz laboratuvarında çalışırken gerçekleşti. Maxwell'in önerdiği tekniği ve kendi tasarımı olan, Alexander Graham Bell'in sağladığı maddi destekle imal edilmiş bir interferometreyi kullandı. Fakat öngörülen sonuca dair hiçbir kanıt bulamadı. O sıralarda bunu kimse çok dert etmemişti, çünkü deney zordu (bu yüzden de sonuç yanlış olabilirdi); ayrıca dünyanın esiri de beraberinde sürüklüyor olabileceği ileri sürülmüş, böylece dünya yüzeyinde yapılan ölçümlerin "esir hareketi"ni tespit etmeyeceği sonucuna varılmıştı.

Michelson Annapolis'e bir daha dönmedi, Donanma'dan istifa edip 1882'de Ohio-Cleveland'daki Case Uygulamalı Bilimler Akademisi'nde fizik profesörü oldu. Orada yaptığı ilk şeylerden biri ışık hızını ölçmekti. Bulduğu sonuç 186 320 mil/sn idi (299 845 km/sn). O zamana kadar yapılmış en doğru ölçümdü. Michelson bunu geliştirene kadar da on yıl öyle kaldı.

Ne var ki, 1885'te Hollandalı fizikçi Hendrik Lorentz esir direnci etkisinin işe yaramayacağını ve dünya esirin içinde hareket ederken, ışığın esire göre sabit bir hızla hareket ettiği fikrinin astronomik ölçümlerle bağdaşmadığını gösterdi. Bu durum, Michelson'ı Edward Morley'yle güçlerini birleştirmeye teşvik etti. Morley de o sırada yine Cleveland'da bulunan, daha sonra (Case'le birleşip) Western Reserve Üniversitesi adını alan okulda kimya profesörüydü.

Morley de (1838-1923) Michelson gibi meslek hayatını hassas ölçümlere adamıştı. Bunların arasında havadaki oksijen oranı ve oksijenin atom ağırlığı da vardı. Becerilerini Michelson'ın becerile-

riyle birleştirip bir kere daha dünyanın esir içindeki hareketini ölçmeye çalıştı. 1887'de, Michelson'ın daha önce bulduğu sonucu teyit ettiler, fakat bunu o kadar hassas bir ölçümle yaptılar ki artık gerçekten de bir şeyler döndüğüne ama aletlerin bunu saptamak için yeterince hassas olmadığına bel bağlamak mümkün değildi. Dünyanın esire göreli hareket ettiğine dair hiçbir delil yoktu. Başka bir deyişle, ışık dünyaya göre ne tarafa hareket ederse etsin hızı aynıydı.

Bu nasıl olabilirdi?

Özel Görelilik Kuramına Doğru

Dikkatli düşününce, esirin var olduğuna dair de bir delil yoktur. Viktorya dönemindeki insanların inandığı türden esirin, çok özgül özelliklerin bir birleşimine sahip olması gerekir. Bir kere, ışık dalgalarının bir cismin içinden o kadar çabuk geçebilmesi için söz konusu cisim son derece sert olmalıdır. Cisim ne kadar sertse, içinden geçen titreşimler o kadar hızlı hareket eder – örneğin, çelik çubuk içinden geçen sesin hızı havadakinden daha büyüktür. Fakat sesin havadaki hızı sadece 344 m/sn'dir, çelikte bile saniyede 5 000 metredir. Titreşimlerin saniyede 300 000 *kilometre* hızla yol alacağı kadar sert bir madde düşününce esirin kilit özelliklerinden biri hakkında yeterince bir fikriniz olur.

Öte yandan esirin çok seyrek de olması gerekir. Ne de olsa, dünya esir içinde hareket eder ve görünüşe göre bir engelle karşılaşmaz – yörüngesinde esirin direnciyle yavaşlamaz. Bir de ışığı yayabilmesi için esirin her yerde olması gerekir – havanın atomları ve molekülleri arasında bile. Her adım attığınızda esiri yararak geçebilmeniz, ciğerleriniz dolusu esiri içinize çekebilmeniz ve bir yerden bir yere ışık iletmek dışında sizin üzerinizde hiçbir etkisi olmaması gerekir.

Michelson ve Morley'nin çalışmaları olmasaydı bile belki de çok geçmeden 19. yüzyıl bilim insanları esir fikrinden zaten vazgeçilmesi gerektiğine karar vereceklerdi. Faraday'ın sunduğu alternatif öneri, elektrik ve manyetik kuvvet alanlarının boş uzayda yayıldığı fikri bir kuşak sonra, Maxwell denklemlerinin, değişen elektrik ve manyetik alanların nasıl kol kola elektromanyetik dalga ola-

rak yayıldığını göstermiş olmasından sonra bile hâlâ tamamen kabul edilmiş değildi. Fakat zamanı geliyordu.

Işığın davranışını açıklamak için fizikçilerin dünyayı kavrayış biçiminin ne kadar dehşetli bir değişikliğe uğrayacağının ilk işaretleri Michelson ve Morley'nin 1887'deki kesin deney sonuçlarının hemen arkasından geldi. 1851 Dublin doğumlu İrlandalı fizikçi George Fitzgerald, Heinrich Hertz'in çalışmasına işaret ederek dalgalanan elektrik akımının şimdi radyo dalgası olarak bildiğimiz şeyi nasıl üretmesi gerektiğini doğru tahmin etmek suretiyle bilime zaten damgasını vurmuştu. 1889'daysa Michelson-Morley deneyinin sonuçlarının açıklamasını sundu. Deneyin, ışık dünyaya göre hangi yönde hareket ederse etsin, ışık hızında herhangi bir değişiklik tespit edememesinin sebebi bütün deney düzeneğinin (tabii dünyanın da) hareket yönünde küçülmesi olabilirdi. Bu durum sorunu çözerdi – bu tabloya göre dünyaya göreli ışık hızı "gerçekten" dünyanın esir içindeki hareketine bağlıydı, fakat ölçüm aletleri tam da hızın hâlâ *c* olduğu yanılsamasını sağlamaya yetecek kadar küçülmüştü.

Bu tümden de deli saçması değildi. Fizikçiler iki elektrik yükü arasındaki kuvvetin, bunların nasıl hareket ettiğine bağlı olduğunu zaten biliyorlardı – hatta bunu Maxwell göstermişti. Daha güçlü bir kuvvet her şeyi birbirine daha çok çekerdi; Fitzgerald'ın ileri sürdüğü şey de, atomları ve molekülleri bir arada tutan kuvvetlerin, hareket halinde olmaları durumunda (ki bu aşamada hâlâ ima edilen varsayım *esire göre hareket* idi), daha güçlü olacağı ve onları bir araya iyice yaklaştırıp atom ve molekülleri meydana getiren şeyleri küçülteceğiydi.

Aynı fikir 1890'larda bağımsız olarak Hendrik Lorentz tarafından ortaya atıldı; hep bir parça haksızlık olarak görmüşsem de, buna Lorentz-Fitzgerald yerine, Fitzgerald-Lorentz büzülmesi denir. Fakat, 1853-1928 yılları arasında yaşamış ve elektromanyetik üzerine yaptığı çalışmalardan dolayı 1902 Nobel Fizik ödülünü almış olan Lorentz, bu fikri Fitzgerald'dan daha da ötelere taşıdı ve 1904'te (Fitzgerald öldükten üç yıl sonra) Lorentz dönüşümleri diye bilinen bir dizi denklem geliştirdi. Bu denklemler hareket eden bir nesnenin, farklı hızlarda hareket eden gözlemciler tarafından bakıldığında, nasıl sadece uzunluğunun değil, başka özelliklerinin de "dönüştüğü"nü açıklıyordu.

Aslında Lorentz dönüşüm denklemlerini elektromanyetik alanların farklı gözlemcilere nasıl görüneceğini matematiksel olarak açıklamak üzere geliştirmişti; bu denklemler, gözlemcilerin göreli hızlarını Maxwell'in denklemlerine yerleştiriyordu. Bir yıl sonra aynı dönüşüm denklemlerinin mekanik sistemlere de uygulanabileceğini gösterip farklı hızlarda hareket eden gözlemciler için hareket halindeki nesnelerin sadece uzunluğunun değil, zamanının, hızının, hatta kütlelerinin nasıl farklı göründüğünü tarif etmiştir. İlginçtir, Einstein Lorentz'in elektromanyetik üzerine yaptığı çalışmasını sıçrama taşı olarak kullanmışsa da, kendi özel görelilik kuramını geliştirdiğinde, Michelson-Morley deneyinin ışık hızının her zaman aynı olduğuna ilişkin delilinden etkilenmemiştir. Hayatının sonuna doğru, 1954'te ölmeden bir yıl önce sorulan bir soruya cevaben "deneyin kayda değer bir etkisi" olmadığını söylemiştir: "Konu üzerine ilk makalemi yazdığımda [1905] bu sonuçtan haberimin olup olmadığını bile hatırlamıyorum."[33] Peki onu 20. yüzyılın ilk on yılı içinde fizikte devrim yaratacak düşüncelere sevk eden neydi?

Einstein'ın Kavrayışı

Einstein 1905'te 26 yaşındaydı. 1900'de Zürih'teki Teknoloji Enstitüsü'nden (ETH) mezun olmuştu ve 1902'den beri Bern'deki İsviçre patent bürosunda yeni keşiflerin teknik değerlerini (ya da değersizliklerini) belirleyen teknik bir uzman olarak çalışıyordu. Akademik kariyer hayalleri o sırada ETH'nin sunduğu geleneksel eğitimi pek fazla ciddiye almaması sonucu suya düşmüş görünüyordu. Final sınavlarında gayet başarılı olmasına rağmen adı tembele çıkmıştı ve kendisine bir yer bulabilecek profesörlerin bazılarını kendinden soğutmuştu. Fakat patent bürosundaki işler kolaydı, o yüzden fizikle ilgili kendi fikirlerini geliştirecek zamanı bulabiliyordu – çeşitli bilimsel makaleler yazmasına ve özel görelilik kuramıyla çığır açmaya adım adım yaklaştığı yıllarda doktora tezini tamamlamasına yetecek kadar zaman.

33. Aktaran Weber, *Pioneers of Science*, s. 33.

Einstein'ın hayatı ve sonraki başarıları pek çok kitabı doldururdu (ve doldurdu da);[34] fakat burada özel görelilik kuramına ve bize ışığın doğası hakkında ne söylediğine yoğunlaşmak istiyorum. Einstein'ın büyük yeteneği, bir problemin gerçekten ne olduğunu fizik açısından kavrama dehasıydı. Matematik hiçbir zaman onun en güçlü yönü olmamıştı; elbette matematikte de pek çok insandan iyiydi, ama asıl fiziğe yeteneği büyüktü. Onu özel görelilik kuramına götüren kavrayış, Maxwell denklemlerinin gerçekte ne söylediğinin fizik açısından sağlam bir sezgisine dayalıydı. Bir ışık demeti boyunca ışığın hareket ettiği hızla yolculuk edilebilse ne olurdu diye kafa yormaya başladı.

Maxwell denklemlerinin özünü hatırlarsak, *değişen* elektrik alan, dalganın (değişen) manyetik kısmını üretiyordu ve *değişen* manyetik alan da, dalganın (değişen) elektrik kısmını oluşturuyordu. Fakat dalgayla aynı hızla seyahat ediyorsanız, o zaman dalga sizin bakışınıza göre hiç "dalgalanmayacaktır". Sabit kalacaktır, tıpkı denizde düzleşmeden önce donup buza dönüşen deniz dalgası gibi. Maxwell denklemleri (ve tabii deneyler de) açıkça göstermiştir ki durağan manyetik alan elektrik alan meydana getirmez. Keza, durağan elektrik alan da manyetik alan oluşturmaz. Yani ortada bir dalga söz konusu değildir – donmuş bir dalga bile.

Bir kere daha, problem hareketin göreliliğine geldi. Newton'un kendisi, dünya üzerinde hareket eden insanlar, havada uçan kuşlar ya da denizde yüzen sandallar söz konusuyken hareketin göreli olduğunu fark etmişse de, nihai bir referans çerçevesi olması gerektiğini ve bütün hareketin bu esas alınarak ölçülebileceğini düşünüyordu – evrensel bir eylemsiz durum normu. Esir fikri bu tabloya uyuyordu, bütün hareket esire göre ölçülüyordu. Newton aynı zamanda mutlak bir zaman standardı olduğuna da inanıyordu; ona göre bir tür tanrı saati, dur durak demeden herkes için aynı hızda ilerleyip gidiyordu. Fakat bu görünüşte makul fikirler Maxwell denklemleriyle örtüşmüyordu.

Einstein belli bir referans çerçevesine başvurmanın hiç de gerekli olmadığını görmüştü. Evrende bütün hızların karşılaştırılarak

34. Einstein endüstrisine benim kendi katkımı, Michael White'la birlikte yazdığımız kitabı Kaynakça'da bulabilirsiniz.

ölçüldüğü bir eylemsizlik normu olması gerekmiyordu. Tam tersine, *bütün* hareketin göreli olduğunu söylüyordu – yani, herhangi bir insan kendisinin durmakta olduğunu ileri sürüp bütün hareketi de kendine göre ölçebilir. İşin doğrusu, bu hareket göreliliği birbirlerine göre sabit hızla hareket eden gözlemciler için geçerlidir – yani sabit süratle ve doğrusal hareket ederken. İvmeli bir referans çerçevesindeki biri, hissettiği kuvvetten ayrılmakta olduğunu fark edebilir, tıpkı hızlı bir asansör kalkar ya da dururken ağırlığınızda bir değişiklik olduğunu hissetmeniz gibi ya da bir virajı hızla dönerken aracın içinde bir yana savrulmanızda olduğu gibi. Kurama "özel" adını veren işte bu kısıtlamadır. Einstein'ın genel görelilik kuramı ivmeyi, eğik yörüngeleri ve kütle çekimini de içine alacak biçimde bu fikri geliştirmiştir; neyse ki, bu kitapta ele alacağım konular için genel görelilik kuramına hiç ihtiyacımız yok.

Işık demetini meydana getiren elektromanyetik dalgalara gelince, bunlar dalga kaynağının hareket ettiği hızı bilmez ya da umursamaz; bir kere yola koyuldular mı uzayda Maxwell denklemlerinin belirlediği c hızıyla ilerlerler.

Eğer sabit hızlarda hareket eden bütün gözlemcilerin (fizik diliyle, bütün eylemsiz gözlemcilerin) kendilerinin durmakta olduklarını söyleme ve bütün hareketi kendilerine göre ölçme hakları varsa o zaman bütün fizik yasalarını aynı görmeleri gerekir. Ben dünyaya göre ışık hızının dörtte üçü hızla yolculuk eden uzay gemimde bir deney gerçekleştirirsem, sizin kendi uzay geminizle dünyaya göre ışığın yarı hızıyla yolculuk ederken elde ettiğiniz "cevaplar"ın aynısını elde etmem gerekir. Eğer farklı cevaplar elde edersek, hangimizin "gerçekten" hareket ettiğini, hangimizin hareket etmediğini bilirdik.

O halde Newton'un gerçeklik tanımını nasıl değiştirelim de bütün eylemsiz gözlemciler fizik deneyleri yaparken aynı sonuçlara ulaşsın? Einstein, bir ışık kaynağından yayılan bir elektromanyetik ışıma atımının farklı hızlarda yolculuk eden gözlemcilere nasıl görüneceğini düşünerek cevabı buldu. Işık kaynağının referans çerçevesinde, ışık uzaya yayılan küresel bir kabuk oluşturur. O halde bunun *bütün* eylemsiz gözlemcilere küresel bir kabuk gibi görünmesi gerekir, aksi halde gözlemciler hareket ettiklerini bilirler. Işık kabuğunun bütün eylemsiz gözlemcilere küresel görünmesinin tek

yolu ölçümde kullanılan cetvellerin ışık kaynağına göreli hareketleri oranında küçülmesidir. Bu küçülme tam olarak, Lorentz dönüşümleri kullanılarak hesaplanmış Lorentz-Fitzgerald büzülmesidir. Ama dahası da var – özellikle, hızların kendileri, sağduyuya dayalı Newtoncu fikirlere göre vermeleri gereken sonucu vermezler.

Newtoncu sağduyuya göre, mesela, yanınızdan ışık hızının dörtte üçü hızında (0,75*c*) bir uzay gemisi geçse, başka bir uzay gemisi de ters yönde yine 0,75*c* hızında geçse, uzay gemilerinin birbirine göreli hızı 1,5*c* olmalıdır. Fakat Lorentz dönüşümlerine göre bu iki uzay gemisinden birisinin içinde olan kişi ötekinin hızını 0,96*c* olarak ölçecektir. Dahası, uzay gemisindeki biri bir ışık yakarsa, iki uzay gemisindeki insan da bu ışıktaki elektromanyetik dalgaların hızını 1,75*c* olarak değil, *c* olarak ölçecektir. Aslında Lorentz dönüşümlerini kullanınca iki hızı birbiriyle toplayıp, bırakın *c*'den büyük bir sonuç elde etmeyi, *c*'ye eşit bir sayı elde etmenin bile hiçbir yolu yoktur. Her şey bir yana, bunun anlamı şudur: Eğer *c*'den daha küçük bir hızla başlayıp daha sonra hızınızı artırmışsanız (gitgide hızlanmışsanız) *c*'ye asla ulaşamazsınız. Önceden belirlenmiş bir referans çerçevesine göre daha hızlı gitmeniz her zaman mümkündür –mesela, 0.9 *c*'den 0.99 *c*'ye, 0.99 *c*'den 0.999 *c*'ye vs.– fakat asla ışık hızına ulaşamazsınız (ve ışık hızını ölçtüğünüzde kendinize göre daima *c* sonucunu elde edersiniz!).

Şu meseleyi tekrarlamakta yarar var, çünkü kuantum gizemlerinin en iyi çözümünün temel özelliklerinden biri bu:

> Özel görelilik kuramı bize bir ışık demetiyle aynı hızda koşmanın *imkânsız* olduğunu söyler; önceden seçilmiş bir başlangıç çerçevesine göre, ilke olarak, ışık hızına ulaşmaksızın hızınızı istediğiniz kadar artırabilirsiniz – fakat ne kadar yaklaşırsanız yaklaşın ışık demetinin kendi hızını ölçtüğünüzde daima *c* sonucunu bulursunuz.

Özel görelilik kuramının, burada ayrıntılarına giremeyeceğim pek çok büyüleyici içerimleri ve kötü sonuçları vardır. Mesela bu kuram bize kütleyle enerjinin meşhur $E=mc^2$ denklemiyle birbiriyle bağlantılı olduğunu söyler; uzay ve zamanı tek bir uzay-zamanda birleştirir. Fakat halihazırdaki konuyla ilgili olan asıl nokta şudur ki, bu kurama göre hareket halindeki bir saatte zaman daha yavaş akar. Bütün gözlemciler için geçerli olan, tanrı tarafından verilmiş mutlak bir zaman yoktur.

Bu zaman-genleşmesi etkisini, Lorentz-Fitzgerald büzülmesindeki gibi aynı Lorentz dönüşümleri denklemleri belirler. Neler olup bittiğini anlamanın bir yolu da aslında, uzayı ve zamanı ayrı ayrı değil de, uzay-zaman olarak düşünmektir. Einstein'ın ETH'de bizzat hocası da olmuş olan Hermann Minkowski 1908'de bu fikri bulmuş, zamandaki "ileri/geri"yi uzaydaki "ileri/geri"yle, uzaydaki "aşağı/yukarı"yla, uzaydaki "sağ/sol"la aynı kefeye koyarak zamanın dördüncü boyut olarak düşünülmesi gerektiğini söylemiştir. Kilit farklardan biri zamanın ilgili denklemlere uzay boyutlarının tersi bir işaretle girmesidir – geleneksel olarak uzay boyutları "+" işarete, zaman "–" işarete sahiptir, tabii denklem tersi biçimde de aynen işler. Sonuç olarak hareket, uzunlukları *kısaltırken*, zaman aralıklarını *genişletir*. Bu iki etki birbirleriyle örtüşür, öyle ki, hareket eden bir nesnenin küçülme miktarı zamanın genişleme miktarıyla denkleşir.

Göreciler nesneleri uzantı dedikleri ve nesneler nasıl hareket ederse etsin aynı kalan bir tür dört boyutlu uzunluk olarak tanımlarlar. Nesnenin nasıl hareket ettiğine (ya da gözlemcinin nesneye göre nasıl hareket ettiğine) bağlı olarak, uzantı uzunluk ve zaman arasında farklı biçimlerde ayrılıyor gibi görünür.

Benzer bir durumu üç boyutta da görebilirsiniz. Bir kalemi ışığın altına tutun ve yere vuran gölgesine bakın. Kalemi nasıl konumlandırdığınıza bağlı olarak boyu farklı uzunluklarda olabilir, gölgesi sıfırdan kalemin gerçek uzunluğuna kadar değişir, halbuki gerçek boyu aynı kalmıştır. Üç boyutta sabit hızla hareket etmek, dört boyutlu uzay-zamandaki bir nesnenin konumunu değiştirmekle matematiksel olarak eşdeğerdir. Gölgenin değişen uzunluğu, nesnenin maruz kaldığı uzunluk büzülmesinin değişen miktarına denkken, zaman genleşmesi ters yönde hareket eder ve gölge küçülürken o artar. Çevremizdeki üç boyutlu uzay esasen dört boyutlu uzay-zamanın bir gölgesidir.

Elbette söz konusu hızlar ışık hızıyla kıyaslanacak büyüklükte değilse bu etkilerin hiçbiri ortaya çıkmaz. Fakat dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri bu sonuçların *ortaya çıktığıdır*, hem de tam olarak Einstein'ın kuramının öngördüğü gibi. Özel görelilik kuramı pek çok deneyle test edilmiş ve her testten de alnının akıyla geçmiştir; size zaman genleşmesinin uygulamadaki bir örneğini vereceğim.

Dünyanın atmosferi uzaydan gelen kozmik ışın adı verilen parçacıklarla sürekli bombardıman edilmektedir. Bu parçacıklar atmosferin yukarısındaki atomlarla etkileştiğinde, genellikle muon denilen başka bir parçacık yağmuruna dönüşür. Muonların ömürleri çok kısadır; muon olarak sadece birkaç mikrosaniye var olup daha sonra başka parçacıklara "bozunur"lar. Işık hızına yakın yolculuk etseler de, zamana ilişkin sağduyuya dayalı görüşlere göre, dünya yüzeyine gelecek kadar "uzun" yaşamazlar. Fakat, parçacık fizikçileri bu muonların çoğunun yere ulaştığını keşfetmişlerdir. Bunun açıklaması şudur: Muonlar dünyaya göre çok hızlı hareket ettiklerinden, zaman onlar için daha yavaş akar. Daha net söylemek gerekirse, özel görelilik kuramına göre, muonların ömürleri 9 kat uzamıştır – bizim saatlerimize göre, hareketsiz kalmaları durumundan 9 kat daha uzun yaşarlar.

Fakat, hatırlarsanız özel görelilik kuramı aynı zamanda muonların kendilerini hareketsiz duruyormuş gibi gördüklerini de söylemektedir. Kendi referans çerçevelerinde tabii ki yine yere ulaşmadan bozunmaları gerekir, değil mi? Kesinlikle hayır. Muonlar hareketsiz duruyor gibi düşünülürse, ki buna izin vardır, o zaman dünyayı da ışık hızına yakın bir hızla muonların yanından geçip gidiyor gibi düşünmemiz gerekir! Bu da tabii dünyanın muonlara göre Lorentz dönüşümlerindeki hesap oranında küçülmesine sebep olacaktır. Çünkü söz konusu hız aynıdır ve o denklemlerdeki uzay-zaman simetrisi yüzünden büzülme miktarı zaman genleşme miktarıyla aynıdır – 9 kat. Fakat denklemde zamanla ilgili kısmın önündeki ters işaret yüzünden, dünya atmosferinin kalınlığı 9 kat *kısalır*. Muonların bakış açısından kat etmeleri gereken mesafe bizim dünya atmosferini ölçtüğümüzün 9'da biridir sadece. Bu durumda böylesi kısa bir mesafeyi bozunmadan tamamlamak için bol bol zamanları vardır.

Özel görelilik kuramı deli saçması bir hipotez değildir, Newton' un deneysel testini geçer – "şeylerin özelliklerini açıklar" *ve* bu açıklamaları (başarıyla) test etmek için "deneyler sağlar".

Şimdi bu zaman genleşmesi meselesinin sınırlarını zorlasak ne olur? Einstein'ın ışık hakkında sorduğu o ilk soruya dönersek, evren bir ışık demetine (ya da bir fotona) veya bir ışık demetinde yolculuk eden bir kişiye nasıl "görünür"? Bir foton için zaman nasıl akar?

Önce ikinci soruya cevap verelim: Zaman akmaz. Lorentz dönüşümleri bize ışık hızında hareket eden nesneler için zamanın durduğunu söyler. Foton açısından baktığımızda, tabii ki, yanından hızla geçenler kendi dışındaki başka her şeydir. Böyle uç koşullarda Lorentz-Fitzgerald büzülmesi bütün nesnelerin arasındaki mesafeyi sıfıra düşürür. Ya bir elektromanyetik dalga için zamanın var olmadığını, o yüzden de güzergâhı boyunca aynı anda her yerde (evrendeki her yerde) var olduğunu söyleyebilirsiniz; ya da bir elektromanyetik dalga için mesafenin var olmadığını, dolayısıyla da evrendeki her şeye birden "dokunduğunu" söyleyebilirsiniz.

Aslında son derece önemli olan bu fikre, hak ettiği ölçüde dikkat edildiğini hiç görmedim. Bir foton açısından güneşten dünyaya olan 150 milyon km'lik mesafeyi kat etmek hiç zaman almaz, zira bu uzay aralığı foton için mevcut değildir. Fizikçiler bu kayda değer meseleyi göz ardı ediyor gibiler, çünkü hiçbir maddi nesnenin ışık hızına kadar hızlandırılamayacağını, o yüzden de hiçbir insanın (ya da mekanik) gözlemcinin bu garip fenomeni gözlemleyemeyeceğini biliyorlar. Belki de denklemlerin ortaya koyduklarından o kadar şaşkına dönmüş durumdalar ki buradaki içerimleri doğru dürüst değerlendiremiyorlar. Halbuki fotonların bakış açısından uzay ve zamanın bu garip davranışı, kuantum fiziğinin *bütün* göze batan gizemlerini çözmeye yardımcı olabilir (bu konuda sizi ikna edebileceğimi umuyorum). Özel görelilik kuramı ile kuantum kuramının elektromanyetik fenomenlerin güncel bir tarifini verecek biçimde çoktan birleştirildiğini size göstermeden önce, özel görelilik kuramının başka bir içerimine kısaca bakmakta yarar var. Einstein'ın denklemlerine göre *c*'den küçük iki (ya da daha fazla!) hızı birbiriyle toplayarak ışık hızından daha büyük bir göreli hız elde edemezsiniz. Fakat bu denklemler ışıktan daha hızlı yolculuk edilemeyeceğini *söylemiyor*.

Işıktan Daha Hızlı / Zamanda Geriye Yolculuk

Önsöz'de de ima ettiğim gibi, özel görelilik kuramı ilke olarak bir şeyin ışıktan hızlı yolculuk edemeyeceğini söylemiyor. Ama ışık hızı "bariyer"inin geçilmesinin imkânsız olduğunu söylüyor. Bir

parçacık ışıktan daha yavaş hareket ediyorsa, ona ışık hızına kadar hızlandırmak için bile sonsuz miktarda enerji gerekir. Fakat Einstein'ın hareketi tarif eden denklemlerinde ışık hızı ortada olmak üzere güzel bir simetri bulunur. Denklemlere göre eğer ışıktan hızlı yolculuk eden bir parçacık olsaydı *daima* ışıktan hızlı yolculuk ederdi. Işık bariyerinin öteki tarafında o parçacığı ışık hızına *indirmek* de sonsuz miktarda bir enerji gerektirirdi.

Bu denklemler ışıktan hızlı hareket eden olası parçacıklara izin verdiğinden, bu parçacıkların adları bile konmuş durumdadır: Takyon, Yunanca "çevik" anlamına gelir (birkaç fizikçi hafiften şaka yollu, ışıktan yavaş sıradan parçacıkların da bir ada layık olduğunu söyleyip onlara da "tardon" diyor, takyonlara göre "ağır" [*tardy*] olduklarından). Takyonlar gerçekten varsa, bizim bildiğimiz fizik yasalarının "aynası" olan çok garip bir dünyada bulunuyorlar demektir. Işık hızına göreli denklemlerin simetrisi demek, bir anlamda, bu kritik hızın iki yandaki parçacıkları itmesi demektir. Bu adeta sonsuz uzunluktaki ve sonsuz yükseklikteki bir dağ sırtına benzer; dağ sırtının bizim tarafımızdaki parçacıkları kendi hallerine bırakıldıklarında yukarıdan aşağıya yuvarlanırken yavaşlarlar, fakat sırtın öteki tarafındaki parçacıklar şayet bir enerji takviyesi olmazsa yuvarlandıkça hızlanırlar. Bizim yakadan ışık hızına yaklaştıkça ("dağ sırtına tırmanırken") zaman daha yavaş akıp nihayet sırtta ışık hızında durduğuna göre, bariyerin öteki yakasında zamanın yavaş yavaş *geriye doğru* aktığını ve öteki tarafta takyonlar için "sırttan aşağı inerken" –ışık hızından daha da ileriye gittikçe– geriye doğru gitgide daha hızlı aktığını keşfetmek bizi çok da şaşırtmazdı herhalde.

Takyon enerjisini kaybederken hem uzayda, hem de zamanda (geriye doğru) daha hızlı gider. Dolayısıyla parçacık etkileşimiyle (mesela kozmik ışınlar dünyanın atmosferiyle etkileştiğinde) yaratılmış bir takyonun kaderi kısa bir patlamayla bütün enerjisini yaymak ve bu arada olağanüstü bir hıza ulaşıp evrenin öteki tarafına kaçmaktır.

Böyle varlıkların olma ihtimali son derece düşük. Yine de bu kadar heyecan verici bir şeyi keşfetmenin en zayıf ihtimali bile biraz ilgi göstermeye değer, tıpkı büyük bir ikramiye kazanma şansı çok küçük de olsa lotoyu harcadığınız paraya değer bulabileceğiniz gibi. Bu yüzden bazı fizikçiler kozmik ışın yağmurlarında ciddi ciddi

takyonun izlerini aradılar (bu aslında çok mütevazı bir "bahsi" temsil ediyor, zira detektörler daha klasik işler için zaten kurulmuş ve çalışır vaziyetteydi). Mantık olarak, bir takyonun "imza"sının, uzaydan gelen bir parçacığın dünya atmosferinin tepesinde sebep olduğu çarpışmanın yarattığı muon gibi parçacık yağmurlarından hemen *önce* dünya yüzeyindeki bir kozmik ışın detektörünce kaydedilmiş olması gerekirdi. Bu olayda yaratılmış bütün takyonların detektöre doğru giderken zamanda geriye yolculuk yapması gerekirdi!

Bilimkurgu sevenlere (ve bir takyon yakaladıklarında kesin Nobel Ödülü'nü alacak olan fizikçilere) üzülerek belirteyim ki, bu deneylerden takyonların gerçekten var olduklarına dair sağlam bir delil çıkmamıştır. Takyon fikrinin önemi, görelilik kuramı denklemlerinin varlıkların zamanda geriye yolculuk etmeleri ihtimalini hâlâ yok saymadığını göstermesidir. Hiç kimse, akıllı bir uzaylı, uzay aracını açıp yavru kedilerden birisinin sağ mı ölü mü olduğunu fark edince maddi parçacıkların –takyonlar– yaratıldığını ve bu parçacıkların ondan sonra zamanda geriye gidip "baştaki" elektron dalga fonksiyonunu çökerttiğini ileri sürmüyor (her şey bir yana, parçacık, hatta takyon üretmek için de, mc^2 biçiminde bir enerji gerekir). Fakat fizik yasaları zamanda geriye doğru herhangi bir iletişime izin veriyorsa, o zaman hem uzaktan etki ihtimalini değerlendirmeli, hem de uzayda yolculuk eden yavru kedilere bu yönde neler olduğu hakkındaki fikirlerimizi genişletmeye hazır olmalıyız.

In Search of the Edge of Time (Zamanın Kıyısının Peşinde) adlı kitabımda da açık seçik belirttiğim gibi, fizik yasalarında (sadece özel görelilik kuramı değil, genel görelilik kuramı da dahil) zaman yolculuğunu yasaklayan hiçbir şey yoktur. Elbette son derece zordur, sağduyuya da ters. Fakat fizik yasalarına aykırı değildir; ayrıca sağduyuya dayalı fikirlerimiz hem görelilik kuramından hem de kuantum kuramından ağır bir darbe yemiştir, üstelik ikisi de Newton'un onaylayacağı biçimde deneylerle desteklenerek.

Burada ayrıntıya girmeyeceğim. Fakat bunu daha sonrası için aklınızın bir köşesine yerleştirin. Kitabın sonunda söyleyeceğim bazı şeyler sizi bu kadar şok etmeyecek. Şimdilik ışığın kendisine dönelim, özellikle de elektromanyetizma ile kuantum fiziği arasındaki bağlantıya.

Foton Sahneye Çıkar

On dokuzuncu yüzyıla gelindiğinde ışığın bir dalga biçimi olduğu o kadar kesin tespit edilmişti ki ışığın bir parçacık olarak hareket ettiğini ileri sürmek neredeyse kâfirlik sayılırdı. Ne var ki, sonunda ışığın davranışını açıklamak için bunu ileri sürmek gerektiği ortaya çıktı. Yine de fizikçilerin foton fikrini ve dalga-parçacık ikiliğini içlerine sindirmeleri (artık ne kadar olabildiyse) 1920'leri buldu.

İlk adım eski ekolden Alman fizikçi Max Planck tarafından atıldı. 1858 yılında doğan Planck, 1892'de Berlin'deki Kuramsal Fizik Enstitü'sünde fizik profesörüydü. 1890'ların ikinci yarısında Planck ışık da dahil elektromanyetik ışımanın sıcak nesneler tarafından yayılma şeklini açıklama konusunda kahramanca bir gayret sarf etti. Zamanın öteki fizikçileri gibi, karşısında devasa bir muamma vardı. Klasik dalga davranışı yasalarına göre –gitar teline ya da bir gölcüğün yüzeyindeki hareket eden dalgalara uygulandığında harika işleyen yasalardır bunlar– yüklü parçacıkların yüksek frekanslarda (kısa dalga boyuna karşılık gelir) enerji yayması daha kolay olmalıdır. Sıcak bir nesnenin içinde (bir lambanın kızaran teli gibi) sıcaklıklarına bağlı bir hızla sağa sola salınan yüklü parçacıklar (elektronlar) vardır. Bu yüzden klasik tabloya göre herhangi bir sıcak nesnenin tayfın kısa dalga kısmında (morötesi, x-ışınları vs.) yoğun olarak, uzun dalga boylarındaysa (görünen ışık, kızıl ötesi ve radyo bandında) çok az ışıma yayması gerekir. Fakat bildiğimiz lambalar tabii ki öyle yüklü miktarda x-ışını yaymaz, yoksa bu kelimeleri okuyacak kadar hayatta kalamazdınız. Aslında, bütün sıcak nesneler sıcaklıklarına bağlı olan özgül bir dalga boyunu merkez alan bir dalga boyu aralığında en yoğun biçimde ışıma yayar. Güneş sarıdır çünkü yaklaşık 6000 derecedir ve sarı da bu sıcaklıkta en güçlü yayılan renktir; ateşteki kızarmış demir de güneşten bir parça daha az sıcaktır, dolayısıyla biraz daha uzun dalga boylarında, yani tayfın kırmızı kısmında en güçlü biçimde ışıma yayar. Sıcaklıkla ışımanın kendine özgü dalga boyu arasındaki bağlantı kara cisim yasası, bu karakteristik ışıma da kara cisim ışıması diye bilinir ("kara" cisim deniyor çünkü ışımanın siyah bir yüzey tarafından soğurulmasında da aynı kurallar geçerlidir).

Uzun süre uğraştıktan, bir sürü çıkmaz sokağa girip geri döndükten sonra Planck 1900'de bu ikilemden kurtulmanın bir yolunu buldu. Sıcak nesnelerin istedikleri miktarda elektromanyetik enerji yaymalarının mümkün olmaması halinde, kara cisim ışımasının doğasının açıklanabileceğini fark etti. Elektromanyetik enerji, Planck' ın *kuanta* (enerji paketçikleri) adını verdiği, belli bir büyüklüğe sahip paketçikler halinde yayılır (ya da soğurulur, denklemi ne yönden ele aldığınıza bağlı). Her dalga paketçiği frekansına bağlı bir enerjiye sahiptir (enerji aslında şimdi Planck sabiti diye bilinen rakamla frekansın çarpımına eşittir). Bu da kara cismin doğasını aşağıdaki gibi açıklamaktadır.

Sıcak bir nesnedeki elektronların titreşim hızları sıcaklığa bağlıdır ama hepsi tam olarak aynı hızla hareket etmez. Çoğu ortalama bir hızla salınır, fakat bazısı bir parça daha fazla enerjiye sahiptir ve daha hızlı titreşir, bazısı da bir parça daha az enerjiye sahiptir ve daha yavaş salınır. Ortalama değer etrafında daima bir enerji dağılımı vardır, tıpkı bir sınıftaki öğrencilerin ortalama boyları etrafındaki boy dağılımı gibi. Çok yüksek frekanslarda bir *kuantum* (enerji paketçiği) için gereken enerji o oranda büyüktür, sıcak bir nesnedeki yüklü parçacıkların (salınan elektronlar) çok azı bir *kuantum* oluşturacak enerjiye sahip olur. Dolayısıyla birkaç tane kısa dalga paketçik yayılır. Öteki aşırı uçtaysa, düşük enerjili paketçikler için ona karşılık gelen ışımayı oluşturacak pek çok elektron vardır, ama söz konusu enerjiler o kadar cılızdır ki, bütün uzun dalga paketçiklerini birbirine ekleseniz yine yekûn tutmaz. Fakat ortada, cismin sıcaklığına karşılık gelen frekansta paketçikleri oluşturabilecek olan, salınım halinde dünya kadar elektron bulunacaktır ve her bir paketçikte etkileyici bir kızıllık oluşturacak ölçüde bol bol enerji olacaktır.

Planck'ın bu keşfi Aralık 1900'de duyurması kuantum devriminin başlangıcı olarak görülür. Fakat ışığın küçük ışık parçacıkları olarak sadece paketçikler halinde var olabileceğini Planck'ın kendisi *söylememiştir*. Planck'a göre asıl önemli olan, yüklü parçacıkların, elektromanyetik enerjinin ışımasını (ya da soğurmasını) yapan bir özelliğinin iş başında olması ve klasik bir dalga olarak var olsa da, ışığın kendisinin (ve başka elektromanyetik ışıma biçimlerinin) yüklü parçacıkların özelliklerinin belli miktarlar dışında ışımayı ya da soğurmayı önlemesiydi.

Planck'ın hesapları sıcak nesnelerden gelen elektromanyetik ışımayı tarif ederken doğru cevaplar verse de, pek çok insan (Planck'ın kendisi de dahil) "gerçekten" neler olup bittiğini yorumlamada bunların nasıl kullanılacağı bilinmediği için durumdan pek de memnun değildi. Planck çalışmasından dolayı Nobel Ödülü'nü ancak 1918' de alabildi (kaderin cilvesine bakın ki, 1947'ye kadar yaşamış olmasına rağmen kuantum kuramını asla kabul etmemiştir). Bu zamanlamanın nedeni büyük oranda Albert Einstein'ın kuramsal çalışması (bu çalışmasından dolayı 1921'de Nobel Ödülü'nü almıştır) ve Robert Millikan'ın (ona 1923'te Nobel Ödülü'nü kazandıran) deneyleridir.

Yirminci yüzyılın başında Planck'ın paketçiklerinin fiziksel gerçekliğini kabul etme cesaretini sadece Einstein göstermişti. 1905'te yayımladığı bilimsel makalede bir metalin yüzeyindeki elektronların ışıkla koparılmasını (fotoelektrik etki) ışık parçacıklarının (paketçikler) metaldeki elektronlarla çarpışmasının sonucu olarak açıkladı. Her paketçik belli miktarda enerji taşır, bu da sadece frekansına (rengine) bağlıdır. Dolayısıyla, belli renkteki saf ışık için metalden koparılmış elektronlar aynı enerjiyi taşır. Deneyciler 1899'dan beri bu keşif üzerine kafa yoruyorlardı, artık bir açıklama gelmişti. Einstein bu keşfin devrim yaratan doğasının gayet iyi farkındaydı. Bu fikri başka pek kimse ciddiye almamıştı. 1911'de bile, İlk Solvay Kongresi diye bilinen bilimsel bir toplantıda meslektaşlarına şöyle seslendi: "Dalga kuramının deneysel olarak doğrulanmış sonuçlarıyla bağdaşmıyor görünen bu kavramın geçici olduğunda ısrar ediyorum."[35] Sorun Einstein'ın bile hâlâ ya/ya da şeklinde düşünmesindeydi. Işık *ya* dalgaydı, *ya da* parçacık. Dalga olduğuna dair delillerin parçacık ihtimalini ortadan kaldırması gerekiyordu; parçacık olduğuna dair delillerin de dalga olma ihtimalini yok etmesi. *İkisi de* doğru olamazdı, değil mi?

1868-1953 yıllarında yaşamış olan ve ilk Savoy Kongresi'nde Chicago Üniversitesi'nde çalışmakta olan Millikan da aynı hisleri paylaşıyordu; ışığın parçacıklardan meydana gelmiş olabileceğini ileri sürmenin saçma olduğunu düşünüyordu. Böylece fotoelektrik etki üzerine, çok dikkatli bir şekilde tasarlanan ve gerçekleştirilen

35. Gribbin, *Schrödinger'in Kedisinin Peşinde*, s. 81 vd.

bir dizi deneyle Einstein'ın yanıldığını ispatlamaya koyuldu. Ne var ki 1915'e gelindiğinde, kendi düşündüğünün aksine bütün delillerin Einstein'ın haklı olduğunu ve ışık paketçiklerinin gerçekten fiziksel bir varlığı olduğunu gösterdiğini itiraf etmek zorunda kaldı. Bu arada Planck sabitinin büyüklüğünün ilk doğru ölçümünü de elde etmişti; aynı zamanda elektron üzerindeki yükü de yüksek bir hassasiyetle ölçtü. Işık paketçiklerinin fiziksel gerçekliğinin önemini hâlâ kimse anlamamıştı; fakat deneysel deliller inkâr edilir gibi değildi ve çok geçmeden Planck'la başlayarak bu çalışmayla ilgili Nobel ödülleri yağmaya başladı. 1923'te Millikan ödülünü alırken ışık enerji paketçikleri fikri artık kesin olarak tesis edilmişti; fakat bunlara "foton" adı (Yunanca ışık anlamına gelen *photos*' tan dolayı) ancak 1926'da Kaliforniya Berkeley'deki bir fizikçi tarafından verilmiştir. Bu isim ışık parçacıklarının davranışının açıklamasına yönelik yeni bir keşfin hemen arkasından gelmişti, ki söz konusu açıklama kuantum mekaniğinin yaratılmasına yol açacaktı.

Einstein'a Fotonları Saymayı Öğreten Adam

Fizikçilere birle birin toplamının ille de iki yapması gerekmediğini gösteren, o zamanlar Doğu Bengal olarak bilinen Dacca Üniversitesi'nde çalışmakta olan Hintli fizikçi Satyendra Nath Bose kuantum mekaniği ile ışık ve madde kuramına giden yolu açmıştır. 1994 yılı Satyendra Bose'nin hayatı ve zamanında üçlü bir yıldönümü olmuştur. Bose 1 Ocak 1894'te Kalküta'da doğmuş ve 80 yıl sonra, 4 Şubat 1974'te aynı yerde ölmüştür. 1920'lerin başlarındaki en büyük başarısı o sıralarda ışımanın kuantum kuramını oluşturan yamalı bohça halindeki fikirleri alıp her şeyi tutarlı bir bütünde birleştirerek ışık paketçiklerinin matematiksel tarifini elde etmesidir.

Planck 19. yüzyılın sonunda ışıma ve maddenin nasıl etkileşim içinde olduğu tartışmalarına nicemleme (*quantization*) fikrini soktuğunda bu fikri kara cisim ışımasını açıklamak için geçici olarak kullanmıştı. Albert Einstein 1905'te ışığın kendisinin de enerji paketçikleri halinde ifade edilmesi gerektiğini ileri sürmüşse de (Millikan'ın deneyleri de haklı olduğunu göstermişti), 1920'lerin başlarında bile pek çok fizikçi –belki de çoğu– ışığın parçacıklar halin-

de var olduğuna "gerçekten inanmıyordu". Işık parçacığına ancak Bose ışığın kuantum kuramını sağlam bir matematik temele oturttuktan sonra 1926'da bir isim verilmesi ("foton") tesadüf değildi.

Planck kara cisim sorununu elektromanyetik enerjiyi (matematiksel olarak) küçük parçacıklara bölerek çözmüştü. Fakat şunu vurgulamak gerekir ki bu ışıma parçacıklarının herhangi bir fiziksel önemi olduğunu ileri sürmemiş, yalnız, sıcak bir nesnenin enerji yaymasına sebep olan şeyin sadece belli büyüklükte enerjilerin yayılmasına izin verdiğini düşünmüştü. Bu adeta musluktan akan suyun yavaş yavaş lavaboyu doldurması gibidir. Musluğun arkasında borunun içinde şekilsiz bir sıvı halinde sürekliliği olan bir su kitlesi vardır, lavabonun içinde de şekilsiz bir su gölcüğü vardır; fakat damlatan musluğun fiziksel özellikleri sayesinde su musluktan sadece belli büyüklükteki damlalarla kaçar.

Damlatan musluktan yayılan su gibi, Planck'ın kara cisim tarifinde sadece yayma (ya da soğurma) mekanizmasında belli büyüklükte damlacıklar söz konusuydu. Işık ya da elektromanyetik ışımanın başka biçimlerinin sadece küçük topaklar, yani paketçikler halinde var olduklarını kimse, Planck'ın kendisi bile ileri sürmüyordu. 1931'de R.V. Wood'a yazdığı bir mektupta Planck, "[nicemleme] tümden biçimsel bir varsayımdı, öyle ki ne pahasına olursa olsun pozitif bir sonuç çıkarmak dışında onu pek düşünmedim,"[36] demiştir. 1920'lerin başında neredeyse herkes "ışık *kuantumunun*" (ışık enerji paketçiğinin) ışıkla maddenin etkileşiminin şaşırtıcı özelliklerini açıklayabileceğini biliyordu, fakat kimse bunun bir matematik hilesinden öte bir şey olduğuna inanmıyordu; ışığı hâlâ Maxwell denklemleriyle tanımlanmış "gerçek" bir dalga olarak görüyorlardı.

Fakat bir istisna vardı. Hindistan'da fizikçiler ışık *kuantumunu* ciddiye alıyorlardı. Öncü astrofizikçi Meghnad Saha 1919'da *Astrophysical Journal*'da yayımlanan bir bilimsel makalesinde ışıma basıncını tarif etmek için ışık *kuantumunu* kullandı ve sonra Bose' yle ortaklaşa Einstein'ın genel görelilik kuramı üzerine yazdığı bilimsel makalelerinin ilk İngilizce çevirilerinden birini gerçekleştirdi. Bunun ardından gelen tartışmalar sonucunda Bose, Planck'ın

36. Aktaran Dipankar Home, *New Scientist*, 8 Ocak 1994.

kara cisim "yasası"nın, düzgün bir türevinin çıkarılması gerektiğini fark etti: Planck'ın, kuantum ayrıklığının (*discreteness*) temel bileşenini süreğen dalgaların klasik çerçevesine uyarlamasının kaçınılmaz sonucu olan tutarsızlıklardan arındırılması gereken bir türev. Bunun başarılabileceğini keşfetti – *yalnız*, ışık parçacıklarının bizim alışık olduğumuzun dışında farklı bir istatistiğe uyması gerekiyordu.

Bose'nin çalışmasında ilginç olan şey, içinde dalga cinsinden elektromanyetik ışıma tanımı, hatta elektromanyetizma namına hiçbir şey olmamasıydı. Fotonları gündelik hayatta kullandığımızdan farklı bir istatistik yasasına uyarak bir oyuğu dolduran parçacık gazları gibi ele alıp Planck'ın denklemine ulaştı.

Burada neler olup bittiğini anlamanın en kolay yolu aynı değerde yeni basılmış iki madeni parayı düşünmektir. Bu paralarla aynı anda yazı tura atarsanız üç ayrı sonuç görebilirsiniz. İki yazı ya da iki tura ya da bir yazı bir tura. İlk bakışta her bir sonucun eşit olasılığa sahip olduğunu düşünebilirsiniz, mesela yazı-tura ikilisinin üçte bir şansı olduğunu. Fakat biraz düşününce bunun böyle olmadığını görürsünüz.

İki parayı bir şekilde işaretleyerek birbirinden ayırt edilebilir hale getirelim (ya da farklı değerde iki para kullanalım). Şimdi iki yazı-yazı ya da iki tura-tura elde etmenin sadece bir yolu varken yazı-tura elde etmenin (bunu "yazı-tura" ve "tura-yazı" olarak düşünün) *iki* yolu var. Öteki tura geldiği süreci ikisinden biri "yazı" olabilir. O halde iki parayla yazı tura atmanın olası sonuçları *dört* tane olup, yazı-yazı, tura-tura, yazı-tura, tura-yazıdır. Her sonucun gelme şansı dörtte birdir (çeyrek), üçte bir değil. Ve bir yazı bir tura gelmesinin iki yolu olduğundan bu sonucun ihtimali ikide bir, yani yüzde 50'dir (bir çeyrek artı bir çeyrek). Buradaki önemli nokta şu ki eğer madeni paralar birbirinden ayırt edilemiyorsa yazı-tura ikilisi tura-yazı ikilisinden ayırt edilemez.

Fakat parçacıklar gerçekten birbirlerinden ayırt edilebiliyorsa (siz paraları işaretlediğiniz için değil, içsel özelliklerden), istatistikler farklıdır. O zaman yazı tura atmanın, her biri aynı olasılığa sahip dört farklı sonucu vardır. Ayrıntıları çok dert etmeyin; bu basit örnekle sadece parçacıkların birbirinden ayırt edilebilir olması durumunda istatistiklerin farklı olacağını görmüş oluyorsunuz. Başka

bir deyişle, birlikte hareket eden çok sayıda parçacığın davranışını tarif edecek istatistikler ne tür parçacıklarla uğraştığınıza bağlıdır.

Bose fotonlara belli bir şekilde hesaplanması gereken parçacıklar olarak bakıldığında Planck'ın formülünü çıkarabileceğini keşfetti. Fotonlar birbirlerinden ayırt edilemezler (hikâyenin tamamı bu olmasa da, burada bütün karmaşık ayrıntılara girmek niyetinde değilim) ve foton dünyasında fotonların istatistiki davranışı kendi aralarında enerji paylaşımını –farklı enerji hallerindeki foton dağılımını– etkiler.

Foton davranışının başka şaşırtıcı özellikleri de vardır. Fotonlar *korunmazlar*. Mesela bir ışık yakmak için düğmeye her dokunuşunuzda daha çok foton üretirsiniz, güneşten ve yıldızlardan da devasa miktarlarda akıp gelirler. Odanızın duvarları, gözleriniz, dünyanın yüzeyi vs. fotonları hiç durmadan soğurur. Fakat bu süreçler denge halinde değildir ve evrendeki foton sayısı durmadan değişir.

Bu, parçacık olarak düşünmeye alıştığımız türden parçacıkların, örneğin elektronların davranışına hiç benzemez. Elektronlar ne yaratılabilir ne de yok edilebilir, fakat bir elektronla onun "karşı-parçacığı" olan pozitron özel şartlarda birlikte yaratılabilir (ya da yok edilebilir). Evrendeki toplam elektron sayısı (ki bu hesaplamada bir pozitron "eksi bir" elektron sayılır) aynı kalır.

Sonuçta elektron gibi parçacıklar için farklı bir tür istatistiğin geçerli olduğu anlaşılıyor; kuantum fizikçileri buna İtalyan Enrico Fermi ve İngiliz Paul Dirac'ın çalışmalarına istinaden "Fermi-Dirac" istatistikleri diyor. Bose-Einstein istatistiklerine uyduğu bilinen foton gibi parçacıklar topluca "bozon" olarak biliniyorlar; Fermi-Dirac istatistiklerine uyan elektron gibi parçacıklaraysa topluca "fermiyon" deniyor.

Peki neden Bose-Einstein da, sadece "Bose istatistikleri" değil? Bose 1924'te keşiflerini anlattığı bir makaleyi *Philosophical Magazine*'e göndermiş ama hiç cevap alamamıştı. O yüzden aynı yılın Haziran ayında aynı makalenin bir nüshasını Einstein'a gönderdi. Einstein'dan bu yazıyı okumasını (İngilizce yazılmıştı) ve eğer bir anlam ifade ediyorsa yayımlanmak üzere *Zeitschrift für Physik*'e göndermesini istedi. Einstein bu çalışmadan o kadar etkilendi ki Almancaya kendisi çevirdi ve dergiye kendi onayıyla gönderdi. Einstein'ın onayladığı her şey *Zeitschrift*'te belli bir saygıyla karşı-

lanırdı, bu makale de beklendiği gibi 1924 yazında yayımlandı.

Makalenin içerimleri müthişti. Bose fotonları belli bir tür istatistiğe uyan ve kuantum gazı gibi davranan gerçek parçacıklarmış gibi ele alıp elektromanyetik ışıma için kara cisim denklemini elde etmişti. Bose'nin kara cisim yasasında elektromanyetik dalganın *zerresi yoktur*! Einstein yeni istatistik fikrini kendi ele alıp üç ayrı makalede başka sorunlara uygulayarak kuantum kuramına son önemli katkılarını yapmıştır. Gazların farklı şartlar altındaki davranışlarını tarif etmek için yeni istatistikleri kullanıp (istatistikler bazı durumlarda korunan varlıklara da uygulanabilir), başka şeylerin yanı sıra, (geleneksel görüşte dalga olarak kabul edilen) ışığın davranışı nasıl parçacıklar cinsinden açıklanabiliyorsa, uygun şartlarda moleküllerin veya "parçacıklar"ın da dalga gibi davranması gerektiğini göstermiştir.

1924'te tam bu keşfin önemi üzerine kafa yorarken Einstein, Louis de Broglie'nin danışman hocası Paul Langevin aracılığıyla de Broglie'nin doktora tezini okudu. De Broglie elektron gibi parçacıkların dalga gibi hareket edebileceğini dile getiriyordu, ki görünüşte akıl almaz bir iddiaydı bu. Langevin bunun bir deha işi mi yoksa deli saçması mı olduğuna karar verememişti. Einstein ise şöyle yazdı: "Bunun basit bir analojinin ötesinde bir şeyler içerdiğine inanıyorum." De Broglie'nin çalışması böyle bir otoritenin onayından sonra ciddiye alınmış ve Erwin Schrödinger tarafından geliştirilerek kuantum dünyasının tam bir tarifine, dalga mekaniğine dönüştürülmüştür. Schrödinger daha sonra, "dalga mekaniği istatistiklerden doğdu," demiştir. Nisan 1926'da Einstein'a yazdığı bir mektupta ise "sizin Bose'nin gazı üzerine yazdığınız ikinci makale dikkatimi de Broglie'nin fikirlerine çekmemiş olsaydı, bütün bunlar şu anda ya da başka bir zamanda (benim açımdan demek istiyorum) hiç başlamamış olacaktı," yorumunu yapmıştır.[37]

Ne var ki Bose'nin kendisi sonraki birkaç yıl kuantum kuramının heyecan verici gelişiminde yer almamıştır. Bunun yerine daha önceki ilgi alanına, genel görelilik kuramına dönmüş ve Einstein'ın peşinden gidip daha sonra bir çıkmaz sokak olduğu anlaşılan ol-

37. Bu ve sonraki paragraftakileri aktaran Dipankar Home, *New Scientist*, 8 Ocak 1994.

gunlaşmamış bir birleşik alan kuramı araştırmasına girişmiştir. Einstein 1955'te ölünce bu yöndeki araştırmalar gücünü yitirdi ve Bose'nin katkıları büyük ölçüde unutuldu, Bose de hayatının son yirmi yılını bilimi popülerleştirmeye, öğretmeye ve bilimin halk tarafından anlaşılmasını geliştirmeye adadı. "Aslında artık bilimin içinde değildim. Bir kuyruklu yıldız gibiydim, bir kere gelmiş ve bir daha geri dönmemiş bir kuyruklu yıldız," diye yorumda bulunuyordu hayatının sonlarına doğru. Fakat o kuyruklu yıldızın saçtığı parlak ışık fizikçilerin 1920'lerdeki düşünme biçimlerini ve o zamandan beri fiziğin ilerleme biçimini değiştirmiştir.

Fizikçilerin nihayet tatmin edici bir nicemlenmiş elektromanyetik alan kuramı bulmaları, fotonların bir isme kavuşmasından yirmi yılı aşkın bir süre sonra gerçekleşecekti – fakat beklemeye değerdi, zira sonunda buldukları kuantum elektrodinamiği (KED) diye bilinen kuram bugüne kadar elde edilen en başarılı ve doğru bilimsel kuramdır. Elektronların ve elektromanyetik ışımanın birbirleriyle nasıl etkileştiğini anlatır, kütle çekimi ve atom çekirdeklerinin davranışı dışında fiziksel dünyadaki her şeyi açıklar. Bu kuram deneylerde olağanüstü hassasiyet derecelerinde test edilmiştir.

Işık ve Maddenin Tuhaf Kuramı

Bu bölümün başlığını Richard Feynman'ın müthiş kitabı *QED*'nin (*Kuantum Elektrodinamiği*) alt başlığından aldım. 1918'de doğup 1988'de ölmüş olan Feynman kendi kuşağının en büyük kuramsal fizikçisiydi. Bilime pek çok önemli katkıda bulundu, hem çoksatar bir ders kitabı, hem de otobiyografik anılarından oluşan ciltler dolusu çoksatar kitap. Çok saygı duyulan, popüler bir hocaydı ve ömrünün sonuna geldiğinde yeryüzündeki en ünlü bilim insanı olmuştu (aynı zamanda da bilim camiasındaki en ünlü "karakter"). Fakat bütün başarılarının içinde en büyüğü[38] kuşkusuz KED'di, kendi de-

38. En azından bilimsel açıdan en büyüğü. Meslektaşlarımdan biri olan Marcus Chown, CalTech'te öğrenciyken Feynman'dan annesine (yani Chown'un annesine) fiziğin neden önemli olduğunu açıklamasını istemiş. Feynman meseleyi olduğu gibi görmesi için kadına yazmış. Oğlunun çalışmalarının ne olduğunu dert etmemesini söylemiş. "Fizik önemli değil," demiş Feynman, "önemli olan sevgi."

yişiyle "ışık ve maddenin tuhaf kuramı".

KED çok önemlidir çünkü elektronların birbirleriyle ve elektromanyetik ışımayla etkileşimleri dünyadaki hemen her şeyi belirlemektedir. Dünya ve bizler atomlardan oluşuruz, atomlar da merkezde yoğunlaşmış bir çekirdekle, çevrelerindeki elektron bulutlarından ibarettir. Elektronlar atomun görünen "yüzü"dür, atomlarla moleküller arasındaki etkileşimler de aslında elektron bulutları arasındaki etkileşimlerdir. Elektronlar foton alışverişinde bulunarak etkileşime girerler. Elektron bir foton yayar ve bir şekilde "geri teper" ya da elektron bir foton soğurur ve bir "tekme" yer. Atomların etkileşimindeki her şey bu şekilde açıklanabilir.

Bütün kimya kuantum fiziğiyle açıklanır, özellikle de KED'le; biyolojik hayat protein ve DNA gibi kompleks moleküllerin davranışına dayalıdır, ki bu da kimyadır ve nihayetinde elektronların kuantum özelliklerine dayalıdır. Bir atomun çekirdeğinin etrafındaki bulutun içindeki elektronların tutuluş şekli, elektronların negatif yükü ile çekirdekteki protonların pozitif elektrik yükü arasındaki etkileşime dayalıdır, yani o da KED'le yönetilir. Atom çekirdeklerinin kendilerini de içeren radyoaktif bozunma gibi şeyler KED'le açıklanamaz; onlar için farklı bir kuram gerekir. Fakat, atom çekirdekleri içinde neler olup bittiğine dair mevcut en iyi görüşümüz bile kasıtlı olarak KED'in başarısı üzerine modellenmiştir ve bunlar da, KED kadar olmasa da, kendi içlerinde oldukça başarılıdır.

KED'in ne olduğunu birkaç şekilde açıklamak mümkün, fakat ben Feynman'ın açıklamasını beğeniyorum. Feynman meseleyi parçacıklar –fotonlar ve elektronlar– ile olasılık dalgaları cinsinden ele alır. Olasılıklar parçacıkları bulma ihtimalinizin en çok nerede olduğunu söyler, fakat onları bulduğunuzda (iki delikli deneyin elektronlu versiyonunda olduğu gibi) gerçekten parçacık olarak bulursunuz. Feynman, ışık ile maddenin nasıl etkileşime girdiğini çözmede sadece üç şeyin önemli olduğunu söyler. İlki, bir yerden başka bir yere giden bir fotonun olasılığı; ikincisi, bir yerden başka bir yere giden bir elektronun olasılığı; üçüncüsü ise, bir elektronun bir fotonu soğurması ya da yayması olasılığıdır. Eğer bütün elektron ve fotonları içeren olay olasılıklarının hepsini hesaplayabilirseniz, elektronlarla fotonlar etkileşim içindeyken neler olacağını çözebilirsiniz.

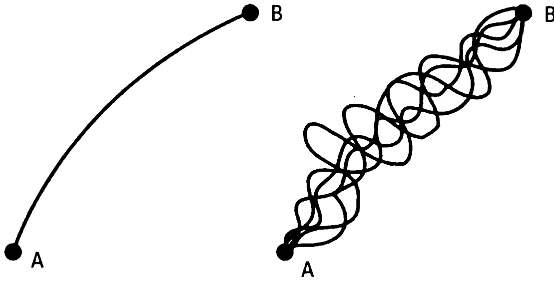
Karmaşık sistemlerde bunu yaparken, her bir hesaplama tek tek

gayet basit olabilmesine rağmen bütünü için anormal sayıda hesaplama gerekir. Böyle hassas hesaplamalar sadece birkaç elektronun birkaç foton alışverişinde bulunduğu nispeten basit sistemler için gerçekleştirilmiştir. Yine de bu hassas örnekler daha karmaşık sistemlere uygulanabilen daha genel yaklaşık değerler (ki bunlar da gayet isabetli olabilir) elde etmek için kullanılır.

Hesaplamalardaki güçlüğün bir kısmı, ben öyle kolayca "bir yerden başka bir yere giden bir fotonun (ya da elektronun) olasılığı" ndan söz edince sizin kafanızda neredeyse kesin olarak düz bir yörüngede A'dan B'ye giden bir parçacık resminin canlanmasıdır. Fakat bu yanlıştır! Feynman'ın KED'in geliştirilmesine yaptığı önemli katkılardan biri, A'dan B'ye giden bütün olası yolları dikkate almamız gerektiğini kavramış olmasıdır. İki delikli deneyde düzenekten geçen fotonun nasıl iki deliğin birden farkındaymış gibi göründüğüne tanık olmuştuk, deneyde adeta her iki yoldan da geçmiş gibiydi. Fakat Feynman daha da ileri gider. Bir parçacık bir yerden başka yere giderken olası bütün yolları dikkate alır, der. Sadece düz yolları ya da düzgün biçimde kıvrılmış yolları değil, aynı zamanda aklınıza gelebilecek en karmaşık ve zikzaklı yörüngeleri de.

İlk bakışta bu fikir gülünç gelebilir; fakat Feynman'ın bu fikre ulaşma şekli bunun (neredeyse!) sağduyu işi olduğunu gösterir. İki delikli deneyde, iki yarığın arkasındaki perdedeki belli bir noktada bir ışık noktası elde etme olasılığı, ışığın iki deliğin her birinden tek tek geçme olasılıkları toplanarak bulunur. Bu gerçekten de sağduyunun bize söylediği şeydir, tabii ışığın doğasındaki parçacık yanını dert etmezsek. Fakat, diyelim ki aradaki perdede iki yerine dört yarık olsun.

O zaman dört olasılık kümesini toplamamız gerekir. Sekiz delik varken sekiz olasılık kümesi hesaplamak gerekir ve bu böyle devam eder. Aradaki perdede jiletle milyonlarca yarık açılsa, ilke olarak deneydeki milyonlarca farklı yolun bütün olasılıklarını hesaplayıp birbiriyle toplayarak ("birleştirerek") uzaktaki perdenin herhangi bir kısmındaki ışığın aydınlığını bulabiliriz. O zamana kadar perdede engelden çok delik oluşacaktır. Peki neden burada duralım? Aradaki perdeyi artık engel kalmayacak şekilde daha da başka yarıklarla delik deşik edebiliriz – "yarıklar" birbirleriyle kesişmeye başlarlar. Feynman arada perde kalmayınca ışık kaynağından

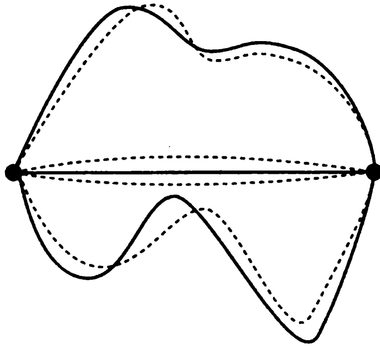


7 Klasik fizik –Isaac Newton'un fiziği– bir parçacığın A'dan B'ye tek bir yörünge izlediğini söyler. Kuantum mekaniğinin Richard Feynman versiyonuna göre A'dan B'ye giden bütün olası yolların etkileri hesaplanıp birbiriyle toplanır – burada gösterilen üç beş yol değil, gerçekten olası bütün yollar. Bu "geçmişlerin toplamı" (ya da "yol integrali") yaklaşımı, tek bir elektronun deneydeki her iki delikten de birden geçip kendisiyle girişim yapmasını anlamanın yollarından biridir.

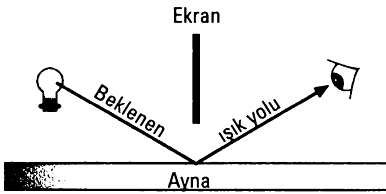
perdedeki noktaya kadar olan bütün olası güzergâhların olasılıklarının toplanması gerektiğini fark etmişti, tabii ortada hiçbir engel olmayınca bunun anlamı deneyde tahayyül edilebilecek bütün yolların olasılıklarının birleştirilmesiydi. Daha karmaşık güzergâhların olasılıkları çok küçüktür ve genellikle hesaplanırken birbirlerini götürürler. Fakat etkileri bir yere gitmemiştir, Feynman'ın ışığın aynada nasıl yansıdığını anlatırken söylediği gibi.

Okulda öğrendiğimiz şeylerden birisi ışığın aynadan yüzeye geldiği açıyla ayrıldığı şeklindedir. Aynaya belli bir açıdan bakıp hangi nesnelerin sizin görüşünüzde olduğuna dikkat ederek bunu kolayca kontrol edebilirsiniz. Okulda öğrendiğimiz başka bir şeye, yani ışığın en kısa süren yolu seçmesine de bir örnektir bu. Işığın yansıtıldığını ve kaynağından dosdoğru gözlerinize gelmediğini düşünürsek bu eşit açılı yansıma, kaynaktan gözlerinize gelen toplam mesafeyi en az kılan yoldur ve bu yüzden de ışığın size geldiği zamanı en aza indirir. Bir nesneden çıkan ışığın gözlerinize gelmeden önce aynanın her kısmında dolaştığını ve aynanın her bir tarafından türlü türlü tuhaf açılarla gelen yansımaların gördüğünüz resmi oluşturduğunu söyleseler aklınız almazdı. Şaşırmaya hazırlanın, zira kuantum fiziğine göre orada olup bitenler gerçekten de budur.

Bir uçta, nesneden gelip aynaya doğru dik açıyla giden ışığı dü-



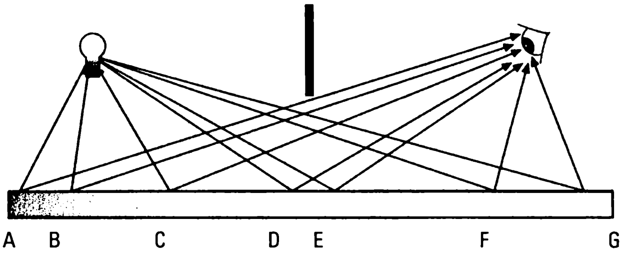
8 Feynman'ın kuantum mekaniğine yaklaşımı ışığa da uygulanabilir. Işık aslında sadece doğrusal olarak hareket etmez, kaynaktan bir gözlemciye giden olası bütün yollardan geçer. "Geçmişler"i topladığınız zaman bir doğruya yakın olanlar hariç hepsi birbirini yok eder.



9 Klasik fiziğe göre ayna ışığı doğrusal olarak yansıtır, böylece geliş açısı daima yansıma açısına eşittir.

şünün, oradan dar açıyla yansıyıp gözünüze gelsin; ya da gözünüzün önündeki aynaya dar açıyla düşen, oradan da dik açıyla yansıyıp size görünen ışığı düşünün. Hatta, ters yönde, sizden *dışarıya* doğru, aynanın uzak ucuna giden ve yansıyıp keskin bir açıyla gözlerinize dönen ışığı düşünün. Bütün bunlar ve diğer ihtimaller gerçekten meydana gelmektedir. Bunları fark etmeyişimizin sebebi en kısa mesafe yolunun yakınındaki yolların sadece daha uygun olması değil, birbirlerini güçlendirerek en kısa mesafeli yolu ezici bir şekilde daha da kuvvetli bir olasılık haline getirmesidir. Bunun nedeni sadece bu "klasik" yörüngeye yakın olan olasılıkların toplanması ve birbirini güçlendirmesidir. Feynman'ın söylediği gibi, "zamanın en kısa olduğu yer, yakındaki yolların zamanının da neredeyse aynı olduğu yerdir"[39] ve olasılıklar da işte burada toplanırlar. Fotonların gözünüze gelmek için tuhaf açılarla yansıdığı ayna kenarlarında "komşu" fotonların kaynaktan aynaya, oradan da gözlerini-

39. Feynman, *QED*, s. 45.



10 Feynman'ın keşfine göre "geçmişlerin toplamı" bazı doğrusal yolları tercih etse de, *bütün* doğru yollar önemlidir. Işık aynanın bütün kısımlarından türlü acayip açılarla yansır, fakat aynanın bu şeridinin yanındakiler klasik yol hariç birbirini yok eder.

ze gelmesi için gereken zaman farkı daha büyüktür. Burada komşu yolların olasılıkları neredeyse birbirini yok eder. Dolayısıyla yansımada önemli olan sadece aynanın içgüdüsel olarak, sağduyuyla bildiğiniz kısmıdır.

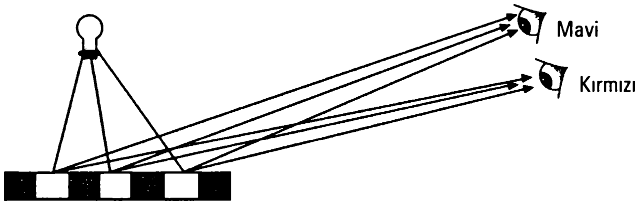
Ama bir dakika! Mesele burada bitmiyor. Birbirlerini yok etseler de aynanın uzak kenarlarından yansıyan fotonların geldiğini gösteren basit bir deney var. Bir aynayı kenar ucundan bir kısım hariç siyah bir örtüyle tamamen kaplayarak yansıtmasını önlediğimizi düşünelim. Örtü ışığı soğuracağı için geldiği açıyla yansıyıp gözünüze gelecek ışığın temsil edeceği bir resim aramanız boşuna olur. Hiçbir resim göremezsiniz. Fakat basit bir hileyle, yani aynanın sadece kenarını kullanıp "ters" açıyla yansıtarak bir resim elde etmek mümkündür.

Kenarın *komşu* kısımlarının olasılıkları birbirini yok etse de aynada olasılıkların toplanacağı şeritler bulabilirsiniz. Buradaki mesele bu şeritlerin arasında olasılıkların başka tarafa gittiği şeritler olmasıdır. Toplamda olasılıklar yok olur; fakat zıt olasılık şeritlerinin ayırdığı, birbirlerini güçlendiren olasılıklar vardır. Tek yapmamız gereken birkaç tane daha siyah şerit örtüyü olasılığın "ters" olduğu yere dikkatlice sermektir. O zaman aynanın görünen kısmı yarıya iner, fakat bütün olasılıklar birbirini güçlendirir.

Birbirini güçlendirme etkisi için gereken şerit aralıkları söz konusu ışığın dalga boyuna bağlıdır (ışık demetini foton cinsinden ifade ettiğimiz için dalga-parçacık ikiliğine harika bir örnektir bu!),

o yüzden net bir resim görmek istiyorsanız deneyi tek renkle (monokromatik ışık) yapmak en iyisidir. Böyle yapınca deney gerçekleşir. Bir parça aynayı yansıma olmayacak şekilde yanlış yerleştirirsiniz ve yansıma olmaz. Sonra aynanın yarısını doğru şekilde kaplayıp (sağduyu bu durumda yansıma şansının daha da az olacağını söylerken) yansıma elde edersiniz.

Böyle bir yansıtıcı şerit sistemine dağıtma (kırınım) ızgarası denir (çünkü yansıma etkisi ışık dalgalarının kırınımı olarak da açıklanabilir) ve muhtemelen bu etkiyi iş başında pek çok defa görmüşsünüzdür. Belli mesafedeki yansıtıcı şeritlerden oluşan bir "ızgara" Newton'un prizmadan geçirince güneş ışığında renklerine ayrılmış olarak gördüğü aynı gökkuşağı örüntüsünü elde edecek şekilde beyaz ışığı yayarak hafif farklı açılarla farklı ışık renklerini yansıtacaktır. Bir kompakt diski ışığın altına tutunca gökkuşağı örüntüsünün oluşması bu yüzdendir. Diski uygun –sağduyunuza doğru gelen– bir açıda tutunca parlak ayna yüzeyinde lambanın sıradan bir yansımasını göreceksiniz, fakat diski eğince, yani sağduyu yansımasını artık göremediğiniz zaman, CD'nin ayna yüzeyindeki oluklarda tuhaf açılarla hoplayıp zıplayan fotonların meydana getirdiği gökkuşağı örüntüsünü görebilirsiniz. Hatta, CD'nin ayna yüzeyinde bir yandan normal resmi görürken bir yandan "ters" bölümünden yansıyan ışıktan renk bantlarını görebilirsiniz. Evinizin güvenli or-



11 Aynanın paralel şeritlerini tamamen siyahla kapladığınızda gerçekten ışığın türlü türlü tuhaf açılarla yansıdığını görebilirsiniz. Bunun anlamı "birbirini yok eden" ışık yollarının ortadan kalktığıdır. Aynanın yarısını örterek aslında daha fazla yansıma elde edebilirsiniz! Böyle bir dağıtım ızgarasında ışığın farklı renkleri bir parça farklı açılarla yansır ve gökkuşağı etkisi yaratır. Bu hile sadece çok dar ayna ve karartma şeritlerinde işler, ama bir CD'yi parlak bir ışığın altında belli bir açıyla tutarsanız bunu kendiniz de görebilirsiniz.

tamında KED'i iş başındayken *görebilirsiniz*.

Bu örnekte yine ışığı farklı açılarda aynadan yansıyıp doğrusal hareket ederken anlattım. Aslında kuramın tam versiyonu ışığın bir yerden bir yere gidebileceği olası bütün yolları hesaba katar, pek çok tuhaf zikzaklı yörünge de dahil. Hesaplar bütün olası yolların toplanmasını (birleştirilmesini) içerdiğinden kuantum fiziğine yapılan bu tür yaklaşıma çoğunlukla "yol-integrali" (ya da "geçmişlerin toplamı") yaklaşımı denir. Neyse ki, olasılıklar daima öyle bir şekilde toplanırlar ki ışık sanki bir doğru üzerinde hareket ediyormuş gibi görünür. Fakat tümden birbirini yok etmeler "klasik" doğrusal yolun uzağında gerçekleşir. "Işık *gerçekten* sadece doğrusal olarak hareket etmez," der Feynman, "yakınındaki yolları 'koklar' ve yanı başındaki boşluğun küçük bir kısmını kullanır."[40]

Olasılıkların birbiriyle toplanmasına dair benzer tanımlar optikteki her şeyi açıklar, merceklerin nasıl işlediğini, ışığın havadan suya geçerken nasıl bükülüp yavaşladığını, iki delik deneyini ve Poisson noktasını. Fakat KED'in zaferi en iyi, foton ve elektronların nasıl etkileşimde olduğunu hassas bir şekilde tarif etmesinde görülür.

KED'in Zaferi

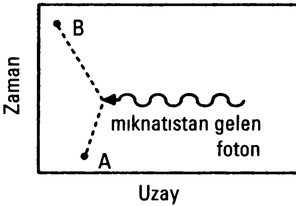
En basit etkileşim bir elektronun bir yerden bir yere giderken bir foton yaydığı ya da soğurduğu ve bunun sonucu olarak da üçüncü bir yere geldiği zamandır. Fotonun kendisi de başka bir yörüngede, başka bir elektron tarafından yayılmış ya da soğurulmuş olabilir. Ya da mesela, bir çubuk mıknatısın manyetik alanıyla bağlantılı bir foton olabilir. Kuantum fiziğinin öncülerinden Paul Dirac ta 1929' da foton ve elektronların etkileşimlerine ilişkin özel görelilik kuramını hesaba katan bir açıklama geliştirmişti, fakat kuantum kuramının gereklerini tam hesaba katmamıştı. Bu açıklamada Dirac bir elektronla fotonun etkileşiminin içerdiği olasılıkları çözüyor ve bunları bir elektronun manyetik alanla nasıl etkileşime girdiğinin ölçüsü olan bir sayıyı hesaplamada kullanıyordu (buradaki özelli-

40. Feynman, *QED*, s. 54.

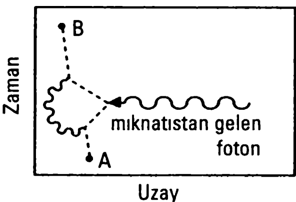
ğe elektronun manyetik momenti denir). Dirac bu sayının belli bir birim sisteminde 1 olması gerektiğini keşfetmişti. Fakat deneyler bu değerin aslında 1.00116 olduğunu göstermiştir.

Fark küçüktü, ama kuramın tamamlanmamış olduğunu göstermeye yeterliydi. 1948'de Harvard Üniversitesi'nde çalışmakta olan Julian Schwinger, Dirac'ın hesaplamasını geliştirecek bir yol buldu. Schwinger (bu arada Feynman'la aynı yılda, 1918'de, ve aynı şehirde, New York'ta doğmuştu) bir elektronun bir yerden bir yere giderken kendinden bir foton yaymasını ve tekrar soğurmasını önleyecek bir şey olmadığının farkına vardı. Bu durum olasılık hesaplarını zorlaştırdı ve sonuç olarak elektronun hesaplanmış manyetik momentini biraz daha büyüttü. Deney ölçümüyle tam örtüşecek kadar doğru bir büyüklük değildi bu fakat doğru yönde bir adımdı.

Fizikçiler neler olup bittiğini anlayınca manyetik momentin daha da doğru hesaplanması için gereken sonraki adımlar artık barizdi, fakat pek çok zahmetli hesap gerekiyordu. Önce manyetik alandaki tek bir fotonla etkileşimde bulunan bir elektronun arka arkaya iki foton yayıp sonra onları soğurduğu ihtimalini düşünün. Bunun meydana gelebileceği bütün olası yolları dikkate almanız ve olasılıkları toplamanız şarttır. Durum o kadar karmaşıktır ki bütün olasılıkları hesaplayıp toplamak ciddi ciddi iki yıl almıştır, fakat sonuç



12 Paul Dirac'ın, elektronun manyetik momentine ilişkin ilk hesaplaması, bir fotonu kapsayan tek bir basit etkileşime dayanıyordu.



13 Elektronun manyetik momentine ilişkin daha doğru bir hesaplama elektronun bir fotonu yayıp sonra tekrar soğurması olasılığını da hesaba katar. Bu hesaplamalardaki gelişmeler işin içine daha da çok foton katmıştır.

kuramla deneyi birbirine daha da yaklaştırmıştır.

1980'lerin ortalarına gelindiğinde hesaplamalar "fazladan" üç fotonun etkisini de içerecek biçimde genişletilmiştir. Her karmaşıklık bir öncekinden daha zayıf bir ihtimal olarak çıkar ve hesapta daha küçük bir düzeltme yapar (her yeni karmaşıklığın hesabı da bir öncekinden *çok* daha zordur). Bu aşamada manyetik momentin kuramsal hesabı 1.00115965246'ydı, son iki hanede yaklaşık yüzde 20 gibi bir belirsizlik vardı. Son yıllarda manyetik moment ölçümlerini geliştiren deneyciler 1.00115965221 gibi (son iki hanesinde yüzde 4'lük bir yanılma payı olan) bir rakama ulaştılar. Bu rakamların doğruluğu Los Angeles'la New York arasındaki 3000 milden fazla mesafeyi (yaklaşık 5000 km) saç teli kalınlığı kadar bir yanılma payıyla ölçmek gibi bir şeydir. İki sayı arasındaki uyum KED'in ne kadar doğru olduğunun ölçüsüdür – deneyle test edilmiş tahminlerde bulunmak açısından en hassas, en doğru kuramdır. Bunu çılgınca bulabilirsiniz; hoşunuza gitmeyebilir. Fakat bunun geçerli olduğunu inkâr edemezsiniz – yani dünyanın gerçekten bu şekilde işlediğini. Feynman'ın sözleriyle "doğada görünüşteki neredeyse bütün devasa çeşitlilik tekrar tekrar şu üç temel eylemin değişmesindeki tekdüzeliğin sonucudur": bir fotonun bir yerden bir yere gitmesi, bir elektronun bir yerden bir yere gitmesi ve bir elektronla bir fotonun etkileşimi.[41]

Fakat bu kuram deneylerle çok güzel desteklenmiş olmasına rağmen bazı çok tuhaf özellikler de içermektedir – şu ana kadar anlattıklarımdan daha tuhaf özellikler. Mesela, iki elektron bir foton alışverişinde bulunup etkileşime girdiğinde neler olup bittiğini tarif etmenin doğru yolu tam da bu kuramdan geçer. Gündelik dille, bir elektron bir foton yayar ve kısa bir süre sonra (ya da uzun bir süre sonra) öteki elektron bunu soğurur. Fakat aynı zamanda ikinci elektronun fotonu "gelecekte" yaydığını ve sonra fotonun zamanda geri gidip "geçmişte" öteki elektron tarafından soğurulduğunu da söyleyebiliriz. Aklın alamayacağı kadar dehşet verici bir fikir değildir bu, özellikle de bir foton için zamanın hiçbir anlamının olmadığını önceden öğrendiğimizi düşünürsek. Fakat aynı şey

41. Feynman, *QED*, s. 110.

elektronların kendisi için de geçerlidir!

Eğer bir fotonun yeterli enerjisi varsa kendisini gerçekten de *bir çift* elektronumsu parçacığa çevirebilir (bunu yapabilmek için fotondaki *E*'nin iki elektrondaki mc^2'den fazla olması gerekir). Bunlardan bir tanesi bildiğimiz elektrondur; diğeri ise tıpkı bir elektron gibi fakat negatif yük yerine pozitif yüklüdür ve adı da pozitrondur. Her zaman olduğu gibi bu süreci ifade eden denklem simetriktir. Elektronla pozitron karşılaşınca süreci tersine çevirir ve birbirlerini yok ederek yüksek enerjili bir foton oluştururlar. Deneylerde defalarca gözlemlenmiş bildik bir senaryoda bir yerden bir yere taşınan yüksek enerjili bir foton bu şekilde bir pozitron-elektron çiftine dönüşebilir. Bu iki parçacık farklı yönlere hareket ederler; çok geçmeden pozitron başka bir elektronla karşılaşır ve birbirlerini yok ederek başka bir yüksek enerjili foton oluştururlar.

Fakat Feynman bütün bu etkileşimin tek bir fotonla da açıklanabileceğini fark etmişti. Bu foton bir yerden başka bir yere giderken yüksek enerjili bir fotonla karşılaşır. Bu etkileşim, fotonu zamanda geriye gönderir. Foton başka yüksek enerjili bir fotonla karşılaşana kadar yolculuğuna devam eder. Fotonla karşılaşınca da tekrar "geri dönüp" zamanda ileriye doğru yolculuk eder. Bu iki etkileşimde de görünüşe bakılırsa üç varlık yer almaktadır – bir pozitron, bir elektron ve bir foton. Benzer şekilde, bir ışık ışınının aynadan yansıdığı yerde de üç varlık bulunuyor gibidir: aynayla bir noktada karşılaştıklarında uygun açıyı yapan iki ışık ışını ve aynanın kendisi. Fakat tıpkı aslında uzayda yansıyan tek bir ışık ışını olduğu gibi, zamanda da yansıyan tek bir elektron vardır. Fotonlar elektronlar için "zaman aynası" görevini görür.

Elektronun zamanda geriye doğru gittiği, bizim ise zamanda ileri doğru gittiğimiz sırada elektron bize bir pozitron gibi görünür ("negatif elektriği uzaklaştırıp", zamanda geriye yollayarak klasik bir çifte-negatif etkisi yaratır ve böylece zamanda ileri yolculuk eden pozitif elektriğe denk olur). Elektronun manyetik momentinin hesaplamaları daha da karmaşık seviyelere doğru giderken, elektronla bağlantılı "fazladan" fotonlar arasında meydana gelen bu tür etkileşimleri hesaba katmanız gerekir.

KED'le ilgili söyleyeceklerimin hemen hepsi bu (siz de zaten ziyadesiyle okuduk diyorsunuzdur). Fakat şunu vurgulamak isterim

ki bu garip içerimler insanları korkutmak için kurgulanmış seçmeli ekstralar değildir. Bunlar fizikte elimizde bulunan en iyi kuramın temel bir özelliğidir; 1965'te *üç* insana Nobel Ödülü'nü kazandırmıştır (Feynman, Schwinger ve Japon araştırmacı Sinitiro Tomonaga) ve bilimin gözbebeğidir. Zamanda geçmişe yolculuk eden foton, hatta elektron gibi tuhaf şeylerden, KED'in kendisinden kurtulmadan kurtulamazsınız.

Bunu söylediğime göre bir de itirafta bulunmak istiyorum. KED' in bir sorunu var. Kusursuz bir kuram değil. Sorun özetle, kendi başına bir yerden bir yere giderken elektrona ne olduğu. Yalnız bir elektron bile fotonları yayıp yeniden soğurabilir ve bu geçici fotonlar bile elektron-pozitron çiftlerine ayrılabilir, ki bunlar da birbirini yok edip yeniden soğurulmuş fotonu yaratabilirler. Hatta bu geçici elektronlar ve pozitronlar bile başka fotonlar yayabilirler (tabii onları yeniden soğurmak şartıyla) ve bu böyle devam eder. KED'e göre, her bir elektronun etrafında bu tür katmer katmer karmaşık etkileşimler sürüp gider. Buradaki sorun şu ki, bütün bu olası kendiyle-etkileşmeler sonsuz sayıda olasılığı da beraberinde getirir. Öyle ki, elektronun yükü ya da kütlesi gibi basit özelliklerin hesaplaması bile elimizde patlar. Cevap sonsuz çıkar, ki elbette saçmalıktan başka bir şey değildir bu.

Feynman, Schwinger ve Tomonaga sonsuz değerlerden kurtulmanın yollarını bulmuştur. Bu hileye renormalizasyon denir ve özetle bir denklemin iki yanını sonsuza bölerek istediğiniz cevabı elde etmekten ibarettir – okulda mutlaka bunu yapmamanız gerektiği söylenmiştir. Bu hile sırf, elektronun özellikleri için istediğimiz cevabı deneylerden *biliyor* olmamızdan dolayı işe yarar. Fizikçiler başka çareleri olmadığı için renormalizasyonu kabul ediyorlar – böylelikle denklemin doğru sonuç vermesi sağlanabilir, oysa başka hiçbir kurama renormalizasyon gibi bir düzenbazlıkla bile bunu yaptıramazsınız. Yani bu üç araştırmacıya Nobel Ödülü bunun nasıl yapılacağını herkese gösterdikleri için verilmiştir. Ne var ki Feynman ölümünden birkaç yıl önce şöyle söylemiştir: "Böyle bir hokus-pokusa başvurmak zorunda kalmak kuantum elektrodinamiği kuramının matematiksel olarak kendi içinde tutarlı olduğunu ispatlamamıza

42. Feynman, *QED*, s. 128.

engel oldu... [renormalizasyon] bana kalırsa aptalca bir yöntem!"[42]

Yani KED şu haliyle son sözü söylemiş sayılmaz. Yeni kuşak kuramsal fizikçilerin yapacağı hâlâ bazı şeyler var. Ne var ki, KED'den daha gelişmiş bir kuram yine KED'in açıkladığı her şeyi, hem de daha doğru olarak açıklamak zorunda, yoksa gerçek anlamda bir gelişme olmazdı. Yani yol integrallerine, uzayda yolculuk ederken komşu yolları "koklayan" parçacıklara ve tamamen fizik kurallarıyla uyumlu bir şekilde zamanda geriye gittiği ifade edilen parçacıklara mahkûmuz. Bu da beni Feynman'ın fazla dillendirilmemiş başka bir keşfine götürüyor. Kuantum dünyasının gizemlerini çözecek bir anahtar olabilir bu.

Gelecek Günlerin Işığı

Feynman'ın fiziğe yaptığı son derece özgün katkılardan ilki olan bu keşif 1940'ta Princeton'da John Wheeler'ın danışmanlığında ihtisas yaptığı zamana rastlar. O sıralarda kuantum kuramının başına bela olan sonsuz değerler gayet iyi bilinen bir sorundu –renormalizasyon numarası sekiz yıl sonra keşfedilecekti– ve Feynman da elektronun kendisiyle etkileşmesini yasaklayarak sonsuzluklardan kurtulup kurtulamayacağını düşünüyordu. Ne yazık ki o numara işe yaramayacaktı.

Elektronlar hızlandırıldıklarında –itildiklerinde– direnirler. Yüksüz bir parçacığın direndiğinden daha fazla direnirler. Bir telde akan elektrik akımı içindeki elektronlar hızlandırıldıkları zaman etrafa (radyo dalgaları biçiminde) enerji yayarlar, fakat onları telde itmek için kullanılan miktarda enerji yaymazlar. Bu, bir telin içinden sabit bir hızla geçen akıma karşı gösterdiği sıradan bir elektrik direncinin ötesinde fazladan bir direniş biçimidir (buna ışıma direnci denir, çünkü ışımayı yaratan hızlandırmayla bağlantılıdır). Işıma direnci sadece elektron bir şeyle etkileşime girince meydana gelir, boş uzayla etkileşime giremeyeceği düşünüldüğünden 1930'larda az önce açıkladığıma aşağı yukarı benzer bir biçimde elektronun kendisiyle etkileşmesi olarak açıklanmıştır.

Fakat Feynman'ın parlak bir fikri vardı. Hiç kimse gerçekten yalıtılmış bir elektron görmemiştir, zira evrende her tür parçacıktan

muazzam sayıda mevcuttur (aslında, biri onu "gördüğü" anda elektron yalıtılmış olmaktan zaten çıkar!). Feynman tek bir elektron dışında tamamen boş bir evren hayal etti ve acaba bu elektron elektromanyetik ışıma yayabilir mi diye düşündü. Wheeler'a, belki de en az iki elektron olması gerektiğini söyledi; biri fotonu yayacak diğeri de soğuracaktı ve ancak o zaman ışıma meydana gelecekti. Sadece iki elektrondan ibaret olan bir evrende, ilki ileri geri titreşerek foton yayabilir, ötekiyse bunun sonucunda fotonları soğurup titreşebilirdi; bu sayede de ilk elektrona kadar gidip onu geri iterek ilk salınımına direnç yaratacak başka fotonlar üretirdi.

Bu yalın haliyle bu fikir işe yaramadı. Temel sorun, zamanda bir gecikme olmasıydı – fotonların ilk elektrondan ikinci elektrona gitmesi sonra tekrar dönmesi ve ancak o zaman elektronun titreşimlerine karşı bir direnç olduğunu "fark etmesi" gerekiyordu. Fakat daha önce gördüğümüz gibi, fotonların alışverişi söz konusu olduğunda zamanın yönü dikkate alınmaz. Meselenin şu anki yönünü bırakıp daha ileriye atlarsak KED (1940'ta daha icat edilmemişti) zamanda ileri ya da geri yolculuk diye bir ayrımda bulunmaz, en azından fotonlar söz konusuyken. Bu gayet mantıklıdır, çünkü KED, foton için zamanın var olmadığını söyleyen özel görelilik kuramının tamamını hesaba katan göreci bir kuramdır. Madem bir fotonun değiş tokuşu sıfır zaman alır, o halde fotonun "saatler"inde +0 mı yoksa -0 mı olduğunun gerçekte bir önemi yoktur. İki kuramın da başarılı olması doğanın kendisinin de (bizim bakış açımızdan) zamanda geriye giden fotonla ileriye giden fotonu ayırt edemediğini teyit etmektedir. Doğanın tek "bildiği" şey bir foton alışverişinin olduğudur.

KED 1940'ta henüz icat edilmemiş olsa da Wheeler ve Feynman, Maxwell denklemlerinin kendisinin de zaman açısından tamamen simetrik olduğunu biliyorlardı. Bir dalganın yayılmasını ifade etmek için denklemleri çözdüğünüzde daima iki sonuç elde edersiniz: Bir tanesi zamanda ileriye hareket eden dalgaya karşılık gelir, diğeriyse zamanda geriye yolculuk eden dalgaya. Yine şimdiki bilgilerle geriye dönüp bakınca, şayet ışığın kendisi sıfır zamanda yolculuk ediyorsa bu da bir anlam ifade eder; fakat Feynman elektronların nasıl enerji yaydıkları hakkında yeni bir fikirle çıkagelene kadar herkes Maxwell denklemlerinin ikinci kısmını göz ardı etmişti,

zira zamanda geriye yolculuk yapan dalga olmayacağı "bariz"di.

Fakat bu, Feynman'la Wheeler'ın tam da Feynman'ın yeni fikrini kurtarmak için ihtiyaç duydukları şeydi. Bu bölümün sonuna kadar ışığın dalga tanımına bağlı kalalım. Bir elektrondan ya da bir radyo anteninden dışarı doğru hareket eden dalgalara "gecikmiş" dalgalar denir, çünkü başka yere ancak yayıldıktan sonra ulaşırlar. Zamanda ileri yolculuk eden dalgalaraysa "ilerlemiş" dalgalar denir, çünkü başka bir yerde yayılmadan *önce* bir yere varırlar. Gecikmiş dalgaları bir radyo anteninden homojen olarak bütün yönlere yayılan halka dalgacıklar olarak düşünebilirsiniz, tıpkı bir gölcüğe taşın düştüğü noktadan etrafa yayılan halka dalgacıklar gibi; yine insan perspektifinden bakıldığında, ilerlemiş dalgalar her yönden antene doğru düzenli bir şekilde gelen halka dalgacıklar gibidir, bir gölcüğün kenarlarından yola çıkıp birlikte düzgün bir biçimde merkeze hareket eden halka dalgacıklar gibi. Analoji burada bozulur çünkü ilerlemiş dalgalardaki bütün o enerji gölcüğün merkezine geldiğinde gidecek bir yer bulamaz; fakat görünen o ki tüm evrenden gelip elektrona ulaşan ilerlemiş dalgalar ışıma direnci dediğimiz sürüklemeyi sağlayan şeyin ta kendisidir. Gelen dalganın enerjisi soğurulur ve elektronun hareketine karşı çıkar. Peki ama ilerlemiş dalgalar elektronu nerede bulacaklarını nereden bilirler? Çünkü elektronun kendisi onlara nereye bakmaları gerektiğini söylemiştir.

"Wheeler-Feynman soğurma kuramı" (danışman hocalar öğrencileriyle yaptıkları ortak çalışmalarda isimlerini başa koymanın bir yolunu buluyorlar) diye bilinen kuramın gözden geçirilmiş versiyonunda bir elektron titreştiğinde geleceğe bir gecikmiş dalga, geçmişe de bir ilerlemiş dalga gönderir. Evrende (uzay ve zamanda) bu dalga nerede başka bir elektronla karşılaşırsa (aslında ne zaman yüklü bir parçacıkla karşılaşırsa), o elektronu titreştirir. Bu titreşimin anlamı o elektronun da hem geleceğe hem geçmişe ışıma yaymasıdır. İşte böyle tek bir elektronun titreşimi sonucunda, bütün evreni dolduran, birbiriyle kesişen etkileşim içindeki elektromanyetik dalgalar denizi oluşur. Dalgaların büyük kısmı birbirini götürür, tıpkı yansımanın kuantum tanımında olasılıkların büyük oranda birbirini götürmesi gibi. Fakat hem geçmişten hem gelecekten gelen bu dalgaların bir kısmı baştaki elektrona döner ve hızlandırılmış elek-

tronların davranışlarını açıklamak için gerekli direnci sağlar.

1941'in başlarında Wheeler, Feynman'a Princeton'daki fizik bölümü için kuram hakkında bir konuşma hazırlamasını söyledi. Bu, Feynman'ın böyle bir izleyici kitlesine ilk resmi sunumu olacaktı ve Princeton bildiğimiz Princeton, yıl 1941, dinleyiciler de hep "üniversitenin" fizikçileri olsa da aralarında Albert Einstein, Wolfgang Pauli (öncü kuantum fizikçisi, o kadar akıllıydı ki 1919'da daha 19 yaşında ve öğrenciyken *hem* özel *hem* genel görelilik kuramı üzerine sarihliğe örnek olarak görülen bir monografi yazmıştı) ve ancak bu dâhilere kıyasla ikinci derece sayılabilecek bilim insanları da vardı. Konuşmadan sonra Pauli yumuşak bir biçimde tanımın matematiksel tekrarlardan ibaret olduğu iddiasıyla itiraz edip Einstein'a aynı fikirde olup olmadığını sordu. Einstein "Hayır," dedi, "kuram makul görünüyor..."[43]

Bu olaydan sonra Feynman'ın bir anda parladığını söylemek abartılı olurdu, fakat hiçbir öğrenci ilk gerçek araştırmasına bundan daha etkileyici bir onay almamıştır. Peki Einstein neden bu kadar etkilenmişti?

Yol integralleri hakkında öğrendiklerinizden sonra, hesaplamalar yapılınca etkileşim içindeki dalga ağı karmaşasının büyük kısmı birbirini yok ettikten sonra başlangıçtaki elektron üzerinde nispeten kolayca anlaşılan bir "tepki" kalmasına şaşırmamanız gerekir. İlerlemiş dalgaların hiçbiri bu tepkinin aracılığının dışında bir yolla tespit edilebilecek bir formda hayatta kalamaz ve tek "gördüğümüz" bildik gecikmiş dalgalardır.

Fakat olayın en güzel yanı, ilk elektron bakımından tepkinin anında gerçekleşmesidir. Bunun bir kısmı geleceğe yolculuk edip bu sırada geriye, geçmişe yolculuk eden dalgaları üreten elektrondan gelen dalgaların sonucu; bir kısmı da geçmişe yolculuk edip bu sırada geleceğe yolculuk eden dalgalar üreten dalgaların sonucudur. Fakat her iki durumda da elektronun yanında duran bir saate göre (aslında bütün saatlere göre) zamanda ileriye giderken geçen zamanla, zamanda geriye giderken geçen zaman aynı olduğundan, dalgaların kat ettiği mesafenin önemi yoktur. Bu tepki elektron hızlandırılır hızlandırılmaz meydana gelir. Wheeler-Feynman kuramı

43. Aktaran Gleick, *Genius*, s. 115.

ışıma direncini *açıklayabilir*, ama Feynman'ın ilk yola çıkarken yapmayı planladığı şeyi, sonsuzlardan kurtulma işini yapamaz. Bilimde genellikle böyle olur. Bir sorun araştırma vesilesi olur, fakat araştırma sonucunda tamamen farklı bir sorunu çözebilirsiniz (ya da daha önce umulmadık yeni sorunlar çıkarabilirsiniz).

Hikâyenin bir yanı daha vardır ki, yarım yüzyıl önce kuramda hayati bir kusur olarak görülmüştür. Bütün bunlar sadece bir elektrondan yayılan elektromanyetik enerjinin her bir parçası zamanda bu şekilde "yansırsa" işe yarar. Şayet ışımanın bir kısmı boş uzaya kaçar ve bir daha yüklü bir parçacıkla karşılaşmazsa o zaman denklem doğru çıkmaz. Eskiden evrenimizin sonsuz genişlikte ve "açık" olduğu düşünülürdü. Zamandaki bütün ışımayı tekrar başlangıcına yansıtmaya çalışmak, ışımayı kapağı olmayan bir kutuya hapsetmeye çalışmaya benzer. Wheeler-Feynman kuramı ancak evren, içinden enerjinin kaçamayacağı kapalı bir kutu (ya da kara deliğin içi) gibiyse doğru sonuçlar verir. Ve inanır mısınız, 1980'lerde ve 1990' larda astronomlar Wheeler-Feynman kuramıyla hiç ilgisi olmayan vesilelerle evrenin gerçekten de "kapalı" olduğuna dair kesin deliller bulmuşlardır.[44]

Bugün soğurma kuramıyla evrenbilim arasında hiçbir çelişki yok. Hatta bazı kuramcılar evrenin bugünkü genişlemesi ile bizim sadece geleceğe hareket eden gecikmiş dalgaları algılayıp bütün yüklü parçacıklarda birleşen ilerlemiş dalgaları algılayamamız arasında çok yakın bir bağlantı görüyorlar. Wheeler-Feynman fikri ışıma direncinin neden meydana geldiğinin ve fotonların yüklü parçacıklar arasında nasıl değiş tokuş edildiğinin en iyi açıklamasıdır, oysa pek çok üniversitede fiziğin öğretilme şekliyle bunu asla bilemezdiniz. İlginçtir, bu bir anlamda atalarımızın haklı olduğu anlamına gelir – gözleriniz gerçekten foton yayar, bir ışık kaynağının yaydığı fotonlarla değiş tokuşun bir parçası olarak; ama bir aynadan tuhaf açılarla yansıyan fotonları içeren yollar gibi gündelik yaşamda kendilerini göstermezler çünkü olasılıklar birbirini yok eder. Tekrar dönmemiz gereken önemli nokta, bir kere daha, bir ışık kaynağından gözlerimize (ya da herhangi bir yere) hareket eden fotonu resmeden eski tablonun eksik olmasıdır; foton için zamanın

44. Bkz. kitabım *In The Beginning*.

bir anlamı yoktur, söyleyebileceğimiz tek şey fotonların ışık kaynağıyla gözlerimiz (ya da neresi olursa) arasında değiş tokuş edildiğidir.

Bunun garip olduğunu mu düşünüyorsunuz? Bu bölümde anlattığım her şey sadece doğru değil, aynı zamanda fiziğin kanıtlanmış, uzun zamandır geçerli olan olguları. Birkaç yıl sonra özel görelilik kuramı yüz yaşına basacak; KED bile ellinci yılına yaklaşıyor. Sağlam temelli bir bilimdir bu; güvenilirdir, tamamen anlaşılmış (en azından hesaplamaların nasıl yapılacağı bakımından) ve deneylerle de defalarca doğrulanmıştır. Fakat dünyanın gerçekten nasıl işlediği hakkında –gerçekliğin gerçekten ne olduğu hakkında– bize bilgi verecek bir kuantum fiziği yorumu bulmak istiyorsak pek çok garip şeyi daha açıklamamız gerekiyor. Bazıları deneylerle daha yeni sınanabilmiş eski fikirler; bazıları deneylerle sınanacak yeni fikirler. Hepsi çok garip, ama hepsi gerçek.

Üçüncü Bölüm

Garip Ama Gerçek

Genel olarak kuantum dünyasının, özel olarak da ışığın davranışının en garip özelliklerinden birini kutuplanma diye bilinen fenomen gösterir. İlk bakışta kutuplanma hareket eden nesnelerin basit bir niteliği gibi görünür ve kutuplanmanın bu doğrultudaki açıklaması Maxwell'in ilk zaferlerinden biridir. Bir kere daha gerilmiş bir ipin bir ucundan tuttuğunuzu hayal edin, öteki ucu da bir ağaca bağlı olsun. Önceki gibi, elinizi aşağı yukarı oynatarak ip boyunca giden dalgacıklar gönderebilirsiniz. Buna sebep olan, ipin aşağı yukarı yaptığı harekettir; şimdi bunu "dikey kutuplanmış" bir dalga olarak düşünebiliriz. Elinizi bir yandan bir yana salladığınızda da ip boyunca giden benzer dalgalar gönderebilirsiniz, fakat bu sefer dalgalar ipin bir yandan bir yana sallanmasıyla meydana gelmiştir; bunlar yatay kutuplanmış dalgalardır.

Birbirine dik açı yapmış iki dalga bileşeninden (dalganın elektrik ve manyetik bileşenleri) oluşmuş bir sistemin bu şekilde nasıl kutuplanacağını kavramak daha zordur. İp analojisi de fotonları düşündüğümüzde tamamen çöker. Fakat burada önemli olan tek bir fotonun bile tercih ettiği bir yönelime sahip olabileceğidir. Bunu kafanızda canlandırmanıza yardımcı olabilecek daha iyi bir resim olmadığından, her fotonun üzerinde bir ibre ya da bir ok hayal edebilirsiniz. İbre dikey (dikey kutuplanmış ışık için), yatay (yatay kutuplanmış ışık için) ya da ikisi arasında bir yerde (arada bir açıyla kutuplanmış ışık için) olabilir.

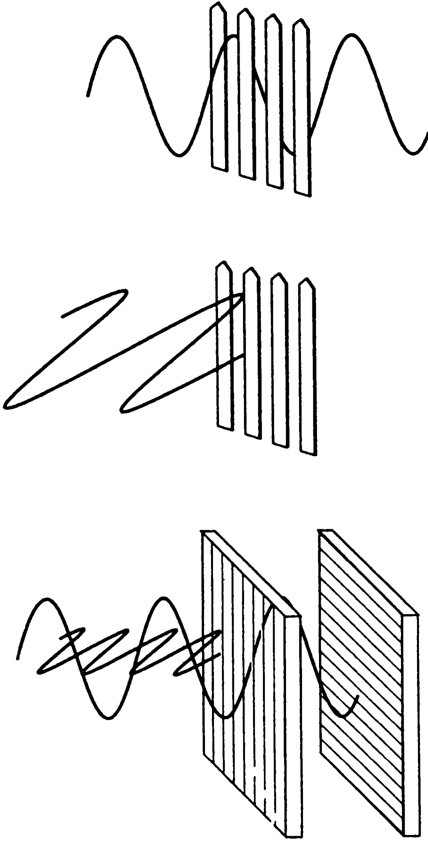
Güneşten ya da sıradan bir elektrik lambasından gelen sıradan ışık kutuplanmamıştır. Bunu şu şekilde düşünebilirsiniz: Işık kaynağından akan sayısız foton rasgele yönlendirilmiştir, biri bir yönde, öteki başka yönde, yani tercih edilmiş belli bir yön yoktur. Fa-

kat, sadece belli yönelimlere sahip fotonların geçmesine izin veren bir maddeden geçirerek kutuplanmış ışık yaratmak kolaydır. Metaforu biraz karıştıralım (hem neden olmasın, doğa her şeyi bir güzel karıştırmış zaten): Eğer elinizden ağaca uzanan ip uzun bahçe parmaklıklarının arasından geçiyorsa yine ip boyunca ağaca kadar dikey kutuplanmış dalgacıklar gönderebilirsiniz. Bir aşağı bir yukarı hareket ederek iki parmaklık arasından geçer; fakat başlattığınız bütün yatay kutuplanmış dalgacıklar parmaklığa ulaşınca engellenecektir çünkü ip parmaklıklara çarpmadan ileri geri gidemez.

Kalsit diye bilinen kristaller başta olmak üzere doğal olarak kutuplanan malzemeler vardır, böyle bir kristaldeki düzenli atom saflarıyla ışık dalgaları karşılaşınca ip-parmaklık durumuna benzer bir şey olduğunu gözünüzde canlandırabilirsiniz. Polaroid güneş gözlükleri gibi yapay kutuplandırıcılar bugün artık her yerde bulunuyor. Güneş gözlükleri iki açıdan etkilidir. Birincisi, sadece tek bir yönelime sahip fotonların geçmesine izin verirler ve diğer bütün fotonları kesip gözlerinize gelen ışığın parlaklığını azaltırlar. İkincisi, yatay yüzeylerden yansıyan ışıklar yatay kutuplanmaya eğilimlidir; eğer camlar sadece dikey kutuplanmış ışığı geçirmek için yapılmışsa (ki öyledir), o zaman yansıtılan göz kamaştırıcı ışığın büyük kısmını keser. İşte bu yüzden Polaroid gözlükler güneş parladığında olduğu kadar gece araba kullanırken de (karşıdan gelen araçların göz kamaştırıcı ışıklarını keserek) işe yarar.

İmkânsız Işığı Görmek

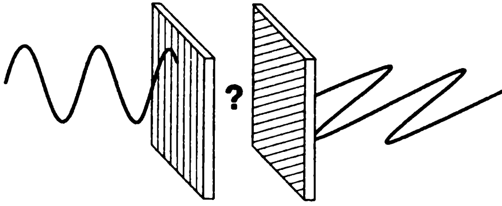
Polaroid gözlükteki camlar normal şartlarda sadece dikey kutuplanmış ışığı geçirdiğine göre, gözlüğü çıkarıp dik açı yapacak şekilde çevirirseniz, yani camlar yan yana değil üst üste gelecek şekilde, o zaman camlar sadece yatay kutuplanmış ışığı geçirecektir – bu durumda bir bakıma "bahçe çiti"ni dik tutmuş oluruz. Yatay kutuplanmış ışık dikey kutuplayıcıdan geçemez, o halde iki Polaroid gözlüğü alıp birini takıp diğerinin bir camını dik açıyla bir gözünüzün önünde tutarsanız arka arkaya konmuş bu iki camdan hiçbir şey göremeyeceğiniz gayet açıktır. İlk defa fotonlar sağduyunun tahmin edeceği gibi davranır; deneyip görün (daha doğrusu, dene-



14 Işık dalgaysa "dikey kutuplanmış" ışığın burada bahçe çitiyle temsil edilmiş kutuplayıcı bir malzemenin içinden nasıl geçip gideceğini anlamak kolaydır (en üstteki resim). Tabii ki, yatay kutuplanmış ışık çitten geçemeyecektir (ortadaki resim). Birbirine dik açıyla "çatılmış" iki kutuplayıcı malzeme hem dikey hem de yatay kutuplanmış ışığa engel olacaktır (en alttaki resim).

yip *göremeyin*!). Bu, bir çift "çapraz" kutuplayıcı örneğidir.

Ne var ki sağduyunun ömrü kısa sürer. Gündelik hayatta, eğer hiçbir şey göremeyeceğiniz bir biçimde arka arkaya konmuş iki camınız varsa, bunların arasına üçüncü bir cam koyunca hiçbir ışığın geçmeyeceği de aynı derece barizdir. Bu sefer sağduyu yanılır. Bir

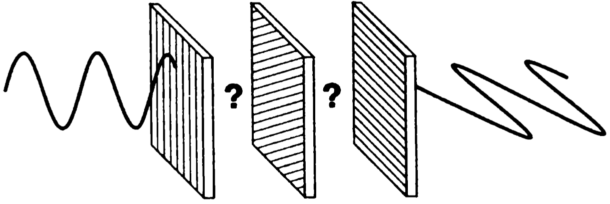


15 Gariptir, eğer ikinci kutuplayıcı ilkine 45 derece açıyla konursa dikey kutuplanmış ışığa engel olmaz. Işığın tam olarak yarısı öteki tarafa geçer, fakat artık 45 derece açıyla kutuplanmıştır.

gözlük daha alıp bu iki gözlüğün arasına her biriyle 45 derece açı yapacak şekilde yerleştirin. Bu fazladan cam olmadan hiç ışık geçmezken ve görüntü siyahken, bu fazladan cam yerine konunca ışığın bir kısmı geçer. Sadece bir cam varkenki kadar değil (aslında onun yaklaşık dörtte biri kadar), fakat sonuçta iki camdan geçemeyen bir parça ışık arka arkaya üçünden birden geçer. Neden?

Neler olup bittiğini birbiriyle dik açıyla çatılmış kutuplayıcıların değil de 45 derece açıyla çatılmış kutuplayıcıların arasından ışığın nasıl geçtiğine bakarak anlamaya başlayabilirsiniz. Şimdi güneş gözlüklerini bir kenara bırakın; söz konusu ışık demetlerinin hassas yönelimlerinden, güç ve yönelime ilişkin doğru ölçümlerden yararlanarak yapılan özenli laboratuvar deneylerinde göreceğiniz şey budur. Diyelim ki ilk kutuplayıcıdan geçen ışık dikey kutuplanmış olarak çıkıyor. Aralıkların 45 derece açıyla durduğu ikinci kutuplayıcıyla karşılaştığında ne olur?

Bahçe çiti analojisini düşününce ışığın hiç geçmemesini bekleyebilirsiniz. Oysa dikey kutuplanmış ışığın tam olarak yarısı ikinci kutuplayıcıdan geçer – öteki taraftan çıkmış ışık da ikinci kutuplayıcının aralıklarıyla bir hizada artık 45 derecede kutuplanmış durumdadır. Böylece, gücü azalmış olan bu ışık ilkiyle çatıldığı için yatay olan üçüncü kutuplayıcıya ulaşınca, ışıkla kutuplayıcı arasındaki göreli açı yine 45 derecedir. Yine ışığın yarısı geçer – ama şimdi ortaya çıkan ışık demeti yatay kutuplanmıştır! Dikey kutuplanmış ışık demetini uygun yönelimli iki kutuplayıcı arasından geçirince, başlangıçtaki gücünün dörtte birine (yarısının yarısı) inmiş ve kıvrılarak yatay kutuplanmış hale getirilmiştir.



16 Daha da garibi, arka arkaya 45 dereceyle yerleştirilmiş üç kutuplayıcı, ışığın dörtte birinin geçmesine izin verir, ışık da yatay kutuplanmış olarak çıkar – fakat, ortadaki kutuplayıcıyı çekerseniz *hiç* ışık geçmez!

Bu deney birbirine çapraz çatılmış kutuplayıcılardan geçen tek tek fotonlar kadar güçsüz bir ışık demetiyle bile yapılabilir. Tıpkı iki delik deneyinde olduğu gibi fotonlar her seferinde bir tane olmak üzere düzeneğe fırlatılabilir. Bunu yaptığınızda, 45 derecelik açıyla duran kutuplayıcıya gelen, dikey kutuplanmış olmasını beklediğiniz fotonun (yani dikey yönelimli kutuplayıcıdan geçmiş olan fotonun) geçme ya da orada kalma şansı yüzde 50'dir. Deneyin ikinci kısmına 100 adet "dikey kutuplanmış" foton gönderilirse 50'si kalacak ve 50'si geçecektir, fakat ölçüldüğünde 45 dereceyle kutuplanmış oldukları görülecektir. Fotonların başlangıçtaki kutuplanmalarına göre yatay olan bir sonraki kutuplayıcıda, kurtulan 50 tanenin 25'i kalacak ve 25'i geçecektir, fakat geçenler yatay kutuplanmış olarak çıkacaktır.

Tabii deney birbirinden farklı yönelimli iki kutuplayıcıyla da yapılabilir. İkisi de dikeyse bütün dikey kutuplanmış fotonlar geçer. İki kutuplayıcı birbiriyle dik açı yapacak şekilde çatılmışsa hiçbir foton geçemez. Ve diğer bütün aradaki yönelimlerde yüzde 0'dan 100'e kadar değişen belli bir oranda foton geçişi vardır. Sanki her "dikey kutuplanmış" fotonun farklı bir kutuplanmayla yöneliminin kesin bir olasılık tanımı var gibidir – yatay kutuplanma şansı sıfır, fakat 45 derecede kutuplanma şansı yüzde 50'dir, ama diyelim ki 30 derecede yönelim şansı daha azdır, 60 derecede yönelim şansı daha çoktur. Fotonun kendisi aslında kutuplanması ölçülene kadar belirsiz bir durumda, bir "üst-üste-binme durumu"ndadır. Ancak o zaman doğru şekilde kutuplanmış olup olmadığına ve kesin olasılık kurallarına göre geçip geçmeyeceğine "karar verir". Paul Davies

bunu şöyle ifade eder:

> Şunu vurgulamak gerekir ki, kuantum belirsizliği bir fotonun gerçekten hangi kutuplanma yönüne sahip olduğunu bilemeyeceğimiz anlamına gelmez sadece, asıl anlamı belirli bir kutuplanma yönüne sahip bir fotonun var olmadığıdır. Fotonun kendi *kimliğinde* içsel bir belirsizlik vardır, sadece onu bilmemizde değil.[45]

Ve dahası da var – çok daha fazlası.

Kalsit kristali Polaroid güneş gözlüklerinden önemli bir yönüyle farklıdır. Bir ışık demeti kristalle etkileşime girince oradan sadece kutuplanmış bir ışık demeti olarak çıkmaz. Kristal, ışığı birbirine dik açıyla kutuplanmış iki demete ayırır ve bunlar kristalin öteki tarafından bir parça farklı yerlerden çıkar. Dikey kutuplanmış ışık kristal içindeki bir yoldan, yatay kutuplanmış ışık da başka bir yoldan geçmiş gibidir. Kristale gelen ışığın bu iki yönelimin ortasında bir yerde kutuplanmasını sağlarsak (bunun için gelen ışığın 45 derece yönelimli bir kutuplayıcıdan geçmiş olması gerekir) elimize iki tane eşit ölçüde güçlü ışık demeti geçer, her biri baştaki demetin yarısı gücündedir, biri dikey, diğeri yatay kutuplanmış ve birbirine paralel hareket eder durumdadırlar.

Tek bir foton kristalden geçince, tabii hangi yolu takip edeceğine "karar vermesi" gerekir ve deneylerin gösterdiğine göre, uygun bir kutuplanmayla şu ya da bu kanaldan çıkar.

Bunu gerçekten bir ışık demetiyle yaparsanız, çıkan iki ışık demetinin yolu üzerine bir kalsit kristali daha yerleştirebilirsiniz, öyle ki dikey ve yatay kutuplanmış ışık demetleri kristalin içinde birleşip yeniden 45 derecede kutuplanmış tek bir ışık demeti olurlar – iki kristal, kristal yapısı ve ışık üzerindeki etkisi bakımından birbirinin tam zıddıdır.

Peki kristalden geçen tek bir fotona ne olur? "Belli ki", ilk kristale ulaşınca yine dikey mi yoksa yatay mı kutuplanması gerektiğine ve hangi kanaldan gideceğine karar vermek zorundadır.

Bu mesele deneye yapılan son bir rötuşla teyit edilmiştir. İki yoldan birini iki kalsit kristalinin arasına siyah bir madde yapıştırarak kapattığımızı düşünelim. Bu madde kanallardan birinden ışık

45. Davies, *Other Worlds*, s. 121.

çıkmasını engelleyecek, ötekine ise dokunmayacaktır. Bunun ilk kristalden çıkacak bütün yatay kutuplanmış fotonları engellemek için yapılmış olduğunu varsayalım. Bu gerçek deneylerde yapıldı. Şimdi, ilk kristale varan fotonların sadece yarısı düzenekten geçip ikinci kristalin öteki tarafından çıkar – fakat hepsi dikey kutuplanmıştır. Dikey kanalı kapatıp sadece yatay kutuplanmış fotonları geçirdiğinizde tamamen aynı şey olur; sağduyunun bir zaferi daha.

Peki yatay kanaldaki engeli kaldırıp düzenekten her seferinde bir fotonun geçmesine izin verirsek ne olur? Sağduyu der ki, hepsi öteki taraftan eşit olasılıkla ya dikey ya da yatay kutuplanmış olarak çıkacaktır. İkinci kalsit kristaline giden tek bir fotonun, hangi durumda olduğuna karar verdikten sonra tekrar 45 dereceyle kutuplanmış bir fotona dönmesini bekleyemeyiz, değil mi? Ama dönüyor işte! Deney düzeneğinden sadece tek tek fotonların geçeceği kadar zayıf bir ışık demeti varken ışığın davranışı, her bir fotonun ikiye bölünüp düzenekteki iki yolu da takip etmesinin ardından yeniden bütünleşip baştaki kutuplanmasına dönmesi gibidir. İlk kristale ulaşan her foton düzenekten geçip gider ve öteki taraftan aynı kutuplanmayla çıkar. Olasılık dalgaları deney düzeneğinin bir ucundan öteki ucuna olası bütün yolları araştırır, nasıl davranacaklarına "karar vermeden" önce bütün deney düzeneğini hesaba katarlar, tıpkı nasıl yansıyacaklarına "karar vermeden" önce aynanın her kısmını kullanmaları gibi. Sanki bu yollardan birini takip eden her foton öteki kanalın açık mı kapalı mı olduğunun farkında olup hareketini ona göre ayarlamış gibidir. Bütün bunlar kuantum kuramı standartlarında eski hikâyeler ve çok uzun yıllardır da bilinmekte. Fakat 1990'lardaki deneyciler tek tek fotonların aynı zamanda hem parçacık hem de dalga olarak davrandıklarını gösteren çok daha incelikli deneyler gerçekleştirdiler.

Işık Üzerine Daha Çok Işık Tutuluyor

Kuantum mekaniğinin standart yorumunun –Kopenhag Yorumu– kilit özelliklerinden biri Niels Bohr'un tesis ettiği tamamlayıcılık fikridir. Buna göre, foton gibi bir kuantum varlığının dalga-parçacık ikiliği gibi bir çifte-doğası olduğunda, hiçbir deney o varlığın

karakterinin bu iki yönünü aynı anda göstermeyecektir. Bohr'a göre, ışığın dalga özelliğini ölçmek üzere tasarlanmış deneyler yapabilirsiniz ve tabii ki dalga özelliklerini ölçersiniz. Ya da ışığı parçacık olarak tespit etmek üzere tasarlanmış deneyler yapabilirsiniz ve gerçekten de parçacıkları tespit edersiniz. Ama, diyordu Bohr, ışığı aynı zamanda hem dalga hem de parçacık gibi davranırken *asla* göremezsiniz.

Fakat Bohr yanılıyordu. 1992'de Japon araştırmacılar Hintli bir ekip tarafından hazırlanmış deneyi gerçekleştirerek tam da bunu gördüler. Tek tek fotonların aynı anda hem dalgavari özellikler hem de parçacıkvari özellikler gösterdiğini gözlemlediler.

Kuantum dünyasını kavrayışımızda bunun tam olarak ne anlama geldiği henüz açık değil. Kesin olan bir şey varsa standart haliyle Kopenhag Yorumu için bunun kötü haber olduğu. Fakat burada paniğe kapılacak bir şey göremiyorum, çünkü zaten Kopenhag Yorumu'nun kuantum gerçekliğinin en iyi açıklaması olmaktan çok uzak olduğu bana bariz görünüyor. Fakat deneye biraz daha ayrıntılı bakmak yerinde olur, sırf kuantum gerçekliğinin tuhaflığına örnek olsun diye.

Hikâyenin en garip yanlarından biri, fizikçiler fotonların dalga gibi davrandıklarını henüz gösterememişken, 1980'lerde, ilkin fotonların gerçekten var olduklarını göstermelerinin gerekmiş olmasıydı. Daha önce bahsettiğim gibi bizim şimdi foton dediğimiz şeyi ilk Albert Einstein 1905'teki fotoelektrik etkisini açıklarken ileri sürmüş ve zahmetleri için de hakkıyla Nobel Ödülü'nü almıştı. Fakat 1950'lerin başlarından itibaren David Bohm'la başlayarak (daha sonra hakkında daha çok şey gelecek) bazı araştırmacılar fotoelektrik etkisinin fotonlara hiç başvurmadan açıklanabileceğini fark ettiler! Işığa, tek tek atomlardan meydana gelmiş olan bir metal yüzeyle (sadece belli miktardaki enerjiyi kabul edebilir) etkileşimde bulunan değişken bir elektromanyetik alanmış gibi davranarak fotoelektrik etkisini açıklamak yine mümkündü. Planck'ın kendisi bu haberi duyunca havaya uçardı, doğruyu söylemek gerekirse bunun anlamı Einstein'ın Nobel Ödülü'nü hak etmediğiydi (en azından ödülün verildiği çalışma açısından); fakat, bilim tarihinin tuhaflıklarından biri oldu ve kısmen bu fikirlerle kamçılanan deneyciler fotonların var olduklarını ispat ettiler.

İncelemek için tek tek fotonlar elde etmek, kısma düğmeli bir lambayı alıp fotonlar her seferinde tek tek yayılacak gibi ışığı zayıflatana kadar kısmaya benzemez pek. Sorunun bir kısmı ışığın pek çok farklı atomdan yayılması, kısmen de her bir fotonun ışığın yayılmasında tam olarak hangi enerji değişikliklerinin (geçişlerin) olacağı konusunda bir tür "tercih"e sahip olmasıdır. Işıktaki enerjinin bir yerden geliyor olması gerekir, nitekim bu enerji atomun içinde bir enerji seviyesinden aşağıdakine atlayıp bu sırada enerji kaybeden elektronlardan gelir. Çoğu kez, belli bir enerji seviyesi alanındaki bu tür geçişlerin pek çoğu bir araya gelerek ışığı oluşturur. Bu da Feynman'ın yol integrallerinde ortalama alınması gibi, olasılıkların ortalamasını almayı gerektirir; bunun anlamı çok zayıf bir ışık atımının tek bir fotondan daha düşük bir enerji taşıyabileceğidir, çünkü pek çok kuantum durumunun bir ortalamasını (ölü-ve-sağ kedi gibi bir üst-üste-binme durumu) temsil eder ve bu durumların çoğu boş olup sıfır foton içerir! Işığın bu tuhaf düşük seviye atımları dalga gibi hareket eder ve uygun biçimde incelikle hazırlanmış deneylerde birbirleriyle etkileşime sokulabilir.

Hakikaten tek bir foton elde etmek için, tek bir atomu kesin enerji seviyeleri arasında tek bir geçişte bir enerji atımı yayacak biçimde tetiklemek gerekir. O zaman üst-üste-binmeye fırsat yaratılmaz ve foton saf, tek bir kuantum durumu içinde çıkagelir. Deneyciler bunu lazerden gelen bir ışıkla enerji verilen ("uyarılan") kalsiyum atomları hazırlayarak yapar. Bir atomdaki elektronları enerji basamaklarında oturuyor gibi düşünün ve elektronlardan birini alıp iki basamak yukarı çıkarın; bir an yüksek enerji basamağının ucunda titrer sonra tekrar aşağıya, önce aradaki basamağa, sonra da (saniyenin sadece 4.7 milyarda biri kadar duraksayıp) ait olduğu yere düşer. Her aşağıya düşüş bir foton biçiminde enerji açığa çıkarır.

Tek bir fotonu yakalamak için uyarılmış kalsiyum ilk-seviye fotona cevap veren ve kısa süreliğine ışığı geçirecek bir "kapı" açan bir detektörle izlenir. Kapının açık olduğu süre atomun uyarılmış ara durumda kalacağı zamana eştir, dolayısıyla ikinci foton yayıldığında kapıdan girip bütün düzenekten geçer.

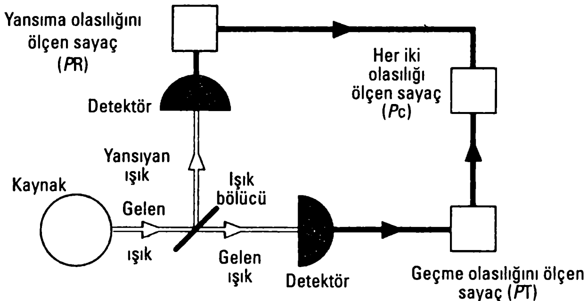
Çalışmalarını Paris'te sürdüren Alain Aspect ve Philippe Grangier 1980'lerde bu tür araştırmaların öncüleriydi. Fotonlarını elde edip ışık bölücü denen bir tür aynaya gönderdiler. Bu ayna gelen

ışığın yarısını geçirir, yarısını da dik açıyla yansıtır. Bu biraz kalsit kristalinin tek ışık demetini ikiye ayırmasına benzer, ama burada kutuplanma etkisi yer almaz. Bu şekilde bir dalganın nasıl ikiye ayrıldığını görmek kolaydır ve sıradan kaynaklardan gelen ışığın ışık bölücüyle bölünmesi sonucu ışık demetleri yeniden birleşip birbirleriyle etkileşime bırakıldıklarında dalga doğalarını doğrularlar (bu deney bir fotonun kesirlerine karşılık gelecek derecede düşük güçlü, sıradan ışık kaynaklarıyla da yapılmıştır). Fakat aynaya bir parçacık ulaşırsa ya geçmek ya da yansımak zorundadır; ikisini birden yapamaz.

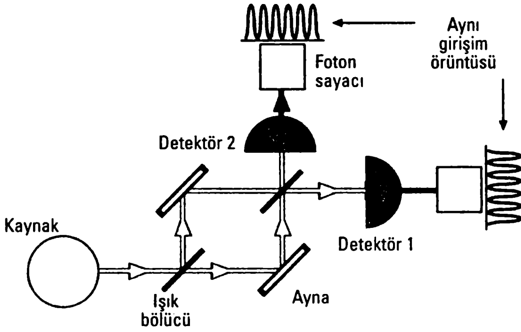
Bölücüden çıkan iki ışık demetinin yoluna detektörler yerleştirilip deney uyarılmış kalsiyum atomlarından çıkan tek fotonlarla gerçekleştirilince, araştırmacılar tam da bunu bulmuşlardır. Fotonlar daima bir yolu ya da ötekini takip eder; iki kanaldaki detektörden hiçbir zaman aynı zamanda işaret gelmemiştir. Öyle olsa ışık yarım yarım iki kanaldan geçmiş gibi bir durum olurdu.

Fakat hikâye burada bitmiyor. Bohr'un tahmin etmiş olabileceği gibi, Aspect ve Grangier parçacık aradıklarında parçacık buldular. Kalsiyum atomlarının foton yaydığını "bildikleri" halde dalga arasalardı ne olurdu?

Bunu yapmak için ışık demetlerine koydukları detektörleri alıp yerlerine ışık bölücünün ayırmış olduğu ışığı birleştirecek aynalar koydular. Bu tıpkı iki delik deneyinin yeniden tesisi gibi bir şeydi.



17 Tek bir foton ikiye bölünebilir mi? Eğer ışık gerçekten parçacıklar biçiminde geliyorsa, o zaman ışık bölücüye gelen her foton ya yansımalı ya da kırılmalıdır. Kuantum kuramına göre detektörlerin kusursuz antikorelasyon kaydetmesi gerekir.



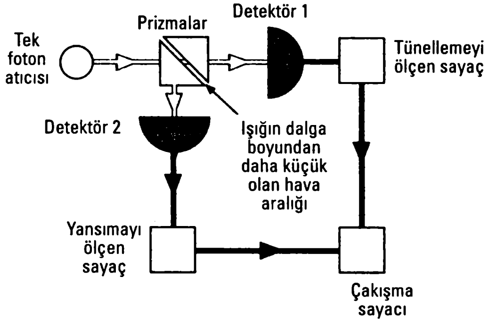
18 Fakat Şekil 17'de gösterilen deneydeki ışık demetleri ikinci bir ışık bölücüde ("geriye doğru işleyen" bir bölücü) birleştirildiğinde tıpatıp aynı girişim örüntüsünü oluştururlar, bu da "tek fotonlar"ın bile dalga davranışı sergilediğini gösterir.

Buldukları şeye gelince, düzenekten daha çok foton geçtikçe dalga davranışına karşılık gelen tipik bir girişim örüntüsü oluşmasıydı.

Paris ekibi aynı ışık kaynağını kullanarak ya parçacıkları ya da dalgaları tespit edebiliyordu, Bohr'un sözünü ettiği tamamlayıcılığa kusursuz ve nihai bir örnek gibiydi. Fakat bu sonuçları ilan eden bilimsel makalelerin daha mürekkebi kurumadan üç Hintli bilim insanı *tek* fotonların *aynı zamanda hem* parçacık *hem de* dalga gibi davrandığını gösterecek yeni bir deney önerisiyle çıkageldi.

Hintli ekibin önde gelen cevheri Kalküta'daki Bose Enstitüsü' nden Dipankar Home'du. Meslektaşları, yine Bose Enstitüsü'nden Partha Ghose ve Haydarabad Üniversitesi'nden Girish Agarwal'dı. Onların getirdiği temel yenilik, ışık bölücü aynalarla başka bir tür ışık bölücüyü değiştirmekti. Bu birbirine neredeyse dokunacak şekilde duran dik açılı iki üçgen prizmadan oluşuyordu.

Prizmalar şeffaf malzemeden yapılma üçgen bloklardan ibarettir, üçgenin uçlarından biri dik açılıdır. Bu tür tek bir prizmayla ışık "kare" cephelerden birine dik geldiğinde, yani içeride "hipotenüs"e 45 derece açıyla vurduğunda dik açıyla tamamen yansıtılır ve öteki "kare" cepheden çıkar. Eğer iki prizma birbirine dokunursa, hipotenüs hipotenüse değecek şekilde bir kare blok yaparlarsa, cephelerden birine dik gelen ışık dosdoğru bloktan geçip öteki taraftan hiç yansıtılmadan çıkar. Fakat, iki hipotenüs yüzeyi arasında minik



19 Bu temanın bir çeşitlemesinde çok ince bir hava aralığıyla birbirlerinden ayrılmış iki prizmanın ışık bölücünün yerini aldığı deneyler yapılmıştır. Işık bu aralığı ancak tünelleme yaparak geçebilir, ki bu da dalga olarak davranması demektir. Fakat *çakışma* sayacı hâlâ kusursuz *çakışmasızlık* kaydeder, oysa bu bir parçacık özelliğidir. Aynı fotonlar aynı anda hem parçacık hem de dalga olarak davranırken yakalanırlar.

bir hava aralığı varsa ışığın bir kısmı yansır ve bir kısmı aralıktan öteki tarafa "tünel" yaparak geçip bir doğru çizerek yoluna devam eder.

Bu numaranın işe yaraması için aralığın gerçekten küçük olması gerekir – söz konusu ışığın dalga boyundan daha küçük. Aslında, aralık bir dalga boyundan küçükse ışığın bir kısmı aralığın farkına bile varmadan geçip gidebilir. Burada her zamanki gibi olasılıklar ve istatistikler giriyor devreye. Aralık ne kadar küçük olursa tünelleme yapan ışık oranı o kadar yüksek olur; dolayısıyla hassas olarak ayarlanmış bir aralıkta ve belli bir ışık dalga boyunda ışığın tam olarak yarısı geçer, yarısı yansır. Ama buradaki temel nokta bu şekilde sadece dalgaların tünelleme yapabileceğidir. Parçacıklar tünelleme yapamaz.

Işık bölücü deneyin bu çeşitlemesi saf, tek fotonlar kullanılarak gerçekten Hamakita'daki Hamamatsu Photonics'ten Yutaka Mizobuchi ve Yoshiyuki tarafından yapılmıştır. Deneylerinin inceliğiyle ilgili bir fikir edinmeniz için, aralığın metrenin milyarda 20 ila 30'u değerinde ayarlanmış olduğunu söyleyebiliriz. Bir kere daha prizmadan çıkması umulan (yansıyan ya da geçen) iki ışık demetinin önüne detektörler yerleştirildi. Tek fotonlar ikiye bölünemez, dola-

yısıyla her zamanki gibi şimdi de hava aralığına gelen her bir fotonun geçme ya da yansıma şansı yüzde 50'dir. O halde iki sayaç sadece çakışmasızlık halinde (yani asla birbiriyle aynı anda olmamak üzere) "öterse" o zaman ışığın deney düzeneğinden foton olarak geçtiğinin kanıtı olacaktı.

Fakat deneydeki dosdoğru yolu takip eden bütün fotonlar bunu ancak tünellemeyle yapmış olabilirdi. Başka bir deyişle, dalga gibi davranarak. Deney gerçekleştirildiğinde araştırmacılar gerçekten de fotonları yarı yarıya bu kanallarda buldular, böylece fotonların aralıkta dalga gibi davranıp tünelleme yaptığını doğrulamış oldular. Ayrıca detektörlerin kesin bir çakışmasızlıkta öttüklerini keşfettiler, ki bu da fotonların aralıkta parçacık gibi davrandığını ve ikiye bölünmediğini doğruluyordu. Deneyde aynı fotonların aynı zamanda hem dalga hem parçacık olarak davrandığı (hava aralığıyla karşılaşınca) gözlemlenmiştir. Bu da Bohr'un temel tamamlayıcılık ilkesiyle çelişmektedir. Home şöyle söylüyor: "Newton'dan üç yüzyıl sonra 'ışık nedir?' sorusuna hâlâ cevap veremediğimizi itiraf etmek zorundayız"; ardından da coşkuyla Albert Einstein'ın 1951'de eski arkadaşı Michelangelo Besso'ya yazdığı mektuptaki sözüne dikkat çekiyor: "Elli yıl canla başla kafa yorduktan sonra 'ışık paketçikleri nedir?' sorusunun cevabına bir adım bile yaklaşabilmiş değilim. Bugünlerde her önüne gelen bunu bildiğini sanıyor, ama yanılıyor."[46] Bu nokta, eğer kuantum kuramı doğruysa tek bir fotonu aynı zamanda iki ayrı yerde gösterecek bir deney tasarlamış olan Yeni Zelandalı fizikçiler tarafından tasdik edilmiş durumdadır.

Çift Görmek

Tabii ki foton aslında aynı anda iki *yerde* değildir. Sadece öyle görünür – kuantum yerbilmezliğine, Einstein'ın canını çok sıkmış olan "hayalet işi uzaktan etki"ye başka bir örnektir bu.

Önerilen deneyde sadece bir ışık bölücü ayna değil, üç taneden oluşan bir düzenek vardır. Başlangıçtaki ışık demeti bölündükten

46. İkisini de aktaran Dipankar Home ve John Gribbin, "Işık nedir?", *New Scientist*, 2 Kasım 1991.

sonra iki yeni kanaldaki ışık demetleri de ışık bölücü aynalara doğru kıvrılacak ve deney düzeneğinden geçecek tek bir foton için toplam dört olası yol yaratacaktır. Bu dört kanalın her birindeki hassas detektörler o belli noktaya ulaşmak için aygıttan geçen her fotonu kaydedecektir.

Bir elektromanyetik dalga demetiyle ne olacağını tahmin etmek ve anlamak zor değil. Işık ilk aynada ikiye bölünecek, bu yarım ışık demetinin her biri de daha sonra karşılaşacağı aynada ikiye bölünecek, her bir çeyrek ışık demeti başlangıçtaki bütün ışık kadar güçlü ve hepsi birbiriyle aynı fazda olmak üzere ilerleyecektir.

Buraya kadar her şey güzel; fakat deney bu değil. Şu ana kadar bütün yaptığımız, ışık demetlerinden oluşan bir referans sistemi kurmaktı. Bu da başka bir kaynaktan düzeneğe gönderilen tek tek fotonların onlarla girişimde bulunduğunda davranışını izlemede kullanılabilir. Auckland Üniversitesi'ndeki Daniel Wallis ve meslektaşlarının önerdikleri şey yukarıda çerçevesi çizilmiş düzeneği alıp ilk ışık bölücüye tek tek ilave fotonlar fırlatmaktır. Fotonlar gerçekten ışık demeti referansına dik açılarla gönderilecek, fakat bu, kanallardan biri ya da öteki boyunca eşit olasılıkla fotonları ikinci aynalara göndermesi gereken aynanın davranışını etkilemeyecektir.

Şimdi işler biraz ilginç hale gelmeye başladı. Deney düzeneğine *hiç* foton fırlatılmadığını varsayarsak, (referans ışık demetini hesaba kattıktan sonra) deneyin öteki tarafındaki dört detektörden hiçbirinin hiçbir foton kaydında bulunmayacağını düşünebilirsiniz. Fakat yanılırsınız. Nasıl ki bir elektronun bir foton üretip akabinde tekrar soğurmasına izin veriliyorsa, "hiçbir şey"in de (yani boşluğun da) kendiliğinden foton üretmesine izin verilir, yeter ki bu fotonlar hemen tekrar boşlukta kaybolsunlar. Bu kuantum belirsizliğinin bir yanıdır – belli bir hacimdeki boşlukta bir fotonun bulunma olasılığının mutlak sıfır olduğunu söylemek mutlak bir kesinliği ima ederdi, ki buna da kuantum kuralları izin vermez. Yani her neresi olursa olsun, bir fotonun küt diye ortaya çıkma olasılığı küçük de olsa vardır. Görünüşe göre kuantum kurallarının yasaklamadığı her şey bir bakıma zorunludur ve hatta boşluğun bu kuantum dalgalanmaları kuantum dünyasının oldukça yerleşmiş bir özelliğidir.

Yani, sadece arada bir, deney düzeneğine hiç foton gönderilmese bile detektörlerden biri ötecektir. Daha da seyrek olarak detek-

törlerin ikisi birden ötecektir çünkü her biri bu "sanal" fotonlardan birinin varoluşa sıçrayışını tespit etmiştir. Tek bir "gerçek" foton düzeneğe fırlatıldığında bu labirentte sadece bir yol takip edebilir, bir detektöre ulaşabilir ve bir sinyal verdirir – parçacık gibi davrandığını varsayarsak. O halde, düzeneğe fotonları arka arkaya tek tek atmanın detektör tespitlerini artırması gerekir. Ama arada bir "gerçek" foton geldiğinde boşluk dalgalanmalarının sebep olduğu karşılaşmalarla başka bir detektörü de etkiler.

Fakat bu kadar basit değil. Kuantum kuramına göre "gerçek" fotonlarla boşluğun fotonlarının arasında bir dolanıklık (*entanglement*) vardır. Hatta girişim vardır. Tıpkı iki delik deneyindeki gibi, bazen iki bileşen birbiriyle birleşir, bazen birbirini yok eder. Gelen fotonların özelliklerine bağlı olarak Yeni Zelandalı ekibin önerdiği deneyde bazen daha fazla çakışma, bazen daha az çakışma olur, bazen de çakışma sayısı aynı kalır. Deneyciler, planlanmış dört detektörlü düzenekte fotonlar her seferinde birer tane fırlatılırken, detektör çiftlerinden birinin basit boşluk dalgalanmalarına karşılık gelen seviyede kalmasını, diğer detektör çiftindeyse aynı anda çok sayıda çakışma olmasını bekliyorlar.

Bu, kuantum etkisinin iş başında olduğunun açık bir göstergesi olacaktır. Bunu sadece saf klasik dalgalar ya da saf klasik parçacıklarla açıklamak mümkün değildir. Bir detektöre ulaşan bir fotonun deneyin öteki tarafındaki ikinci detektörde sanal bir fotonun yoktan ortaya çıkma olasılığını *aynı anda* değiştiriyor olması, iki detektör birden öttüğünde, o tek fotonun aynı anda iki yere vardığı yanılsamasına sebep olur. Başlangıçtaki foton sadece tek bir yerde tespit edilmiştir, fakat onun etkisi aynı anda başka bir yerde olanı etkiler.

Bu deneyin nasıl sonuç vereceği büyük merak konusu. Sonuçların kuantum kuramının öngördüğünden farklı çıkması çok şaşırtıcı olurdu; fakat başka şeylerin yanı sıra, şayet sonuçlar Wallis'in umduğu gibi çıkarsa o zaman boşluk dalgalanmalarının gerçekten var olduğunu teyit etmiş olacaklar. Aktif bir boşluk eski bir fikir, fakat yakından bakılmaya değer.

Hiçbir Şey Karşılığında Bir Şey

Boşluk dalgalanmaları gibi yoktan var olan sadece fotonlar değildir. Kuantum kuralları enerjide belirsizlikle zamanda belirsizlik arasında bir denge sağlar. Çok hafif bir parçacığı (mesela, enerji taşısa da durgun kütlesi sıfır olan fotonu) meydana getirmek için gereken enerji nispeten uzun süreliğine (sadeçe "nispeten uzun", çünkü burada saniyenin küçük kesirlerinden söz ediyoruz) hiç yoktan var olabilir; fakat daha büyük parçacıklar (elektron-pozitron çifti gibi) yapmak için gereken enerji sadece boşluktan nispeten daha kısa bir süreliğine "ödünç" alınabilir (böylece elektron-pozitron çifti çabucak birbirini yok ederek ödünç aldıkları enerjiyi geri verirler). "Hiçbir şey" en iyi, içinde her tür parçacığın varoluşa girip girip çıktığı kaynayıp duran bir girdap gibi gözde canlandırılabilir.

Bunun en uç örneğinde bazı evrenbilimciler ciddi ciddi bütün evrenin bir kuantum dalgalanması olabileceği görüşünü ileri sürmüşlerdir. Evren yaklaşık 15 milyar yaşında olduğundan ve pek çok parçacık içerdiğinden ilk bakışta bu inanılası gelmeyebilir. Ne var ki, bir kütle çekim alanının enerjisi negatiftir (yani kütle enerjisinin pozitif olduğu çerçevede). Eğer evrenin kütlesine karşılık gelen minik bir enerji zerreciği kuantum ölçeğinde varoluşun içine atlarsa, kuramın söylediğine göre, kütle enerjisi ve kütle çekimsel enerjisi birbirini tamamen dengeleyip kuantum evreninin toplamda sıfır enerjiye sahip olmasına, dolayısıyla da çok uzun ömürlü olmasına izin verir. Evreni yoktan var etmenin son aşaması şişme denilen süreci yardıma çağırmaktır. Bu süreç atomaltı küçüklüğündeki çekirdeği saniyenin küçük bir kesrinde bir basketbol topu büyüklüğüne getiriverir, sonra da daha sakin bir şekilde genişlemeye devam eder.

Ama şimdi, hiç yoktan evrenler meydana getirmeyi çok dert etmeyelim. Onun yerine, size boşluğun faaliyetinin sodyum atomlarının üzerindeki etkileri aracılığıyla fiilen tespit edilebileceği bir deneyden söz etmek istiyorum.

Boşluğu "hiçbir şeyin olmaması" şeklinde değil, elektromanyetik alanın pek çok farklı durumunun üst-üste-binmesi şeklinde görmek en doğrusudur (başka alanlar da ekleyebilirsiniz, ama şimdilik

basit tutalım). Alanın farklı durumları adeta, tek bir gitar telini tınlatınca elde edilebilecek farklı notalar gibidir ve (bir atomdaki enerji seviyeleri gibi) her basamağı tek bir fotonun enerjisine karşılık gelecek mesafeyle ayrılmış biçimde bir enerji "merdiveni" oluştururlar. Atom bir foton yaydığında meydana gelen şey, boşluk alanının frekansına karşılık gelecek enerjinin bir birim yükselmesi ve atomdaki elektronun enerjisinin bir birim düşmesidir. Sanal bir fotonun geçici olarak belirmesi, alan enerjisinin kendiliğinden bir basamak yukarı çıkmasına ve sonra geri düşmesine karşılık gelir – kendi kendine çok alçak sesle rasgele notalar çalan bir gitar gibi.

Ne var ki, elektriği ileten bir yüzeyin yakınında boşluk alanı ve dalgalanmaları değişime uğrar, çünkü bir iletken yüzeyindeki alanın elektrik kısmı sıfır olmak zorundadır. Bu da boşluk alanındaki olası faaliyetin bir kısmını yok eder, dolayısıyla iletkenin yakınından geçen bir atom için iletkenin daha ötesinde atomdan yana daha çok boşluk enerjisi vardır. Sonuç olarak atomun iletkene doğru itilmesi gerekir (ya da çekilmesi, bakış açınıza göre değişir) – atomu plakaya çeken bir güç vardır.

Bu fikir 1940'lara kadar gider, fakat bu etki Yale Üniversitesi'nden Ed Hinds ve meslektaşları tarafından daha 1993'te yeni ölçüldü. Benzer bir etki iki iletken plaka boşlukta birbirine son derece yakın konulduğunda meydana gelir; o zaman, plakalar arasındaki boşluk alanının değişimi onları birbirine çeken bir çekim kuvveti üretir. Buna Hollandalı fizikçi Hendrik Casimir'e istinaden Casimir etkisi denir. Bu etki farklı iletken plakalar kullanılarak defalarca ölçülmüştür. Fakat Yale Üniversitesi deneyi çok daha incelikli ve hassastır.

Bu deneyde araştırmacılar altınla kaplı iki minik cam tabakayı iletken olarak kullandılar. İki plaka "V" şeklinde çatıldı. Tepedeki aralık sadece metrenin milyonda birkaçı kadardı ve "V" aralığından farklı yüksekliklerde sodyum atomları gönderildi. Plakalar arasındaki her bir yükseklikteki gerçek mesafe saf tek renkli ışığın ürettiği girişim saçağı kullanılarak metrenin milyarda beşi hassasiyetinde ölçüldü. Böylece deneyciler atomların plakalara tam olarak ne mesafeden geçtiklerini biliyorlardı ve boşluk kuvvetinden ne kadar etkilenmeleri gerektiğini hesaplayabilirlerdi. Atomlar "V" nin öteki tarafından çıkınca atomlardan seken lazer ışık demetleriyle izlendi.

Atomların gözlemlenen davranışı, fazladan kuvveti de hesaba kattığımızda kuantum kuramının öngörüsüyle tamamen uyuşuyor, ama aynı genişlikteki klasik bir kanal içinden geçen atomların tahmin edilen davranışıyla uyuşmuyordu. Böylece "hiçbir şey" in tek tek sodyum atomlarının üzerinde bir etkisi olduğu *ölçülmüş* oldu.

Bu deneyin arkasındaki fikrin yalınlığına ve uygulamaya konuluşundaki o çok hassas inceliğe hayranım (*bir de* kuantum kuramına bir kere daha zafer kazandırmış olmasına). Kuramcıların bu fikri bulmasından ancak 40 yılı aşkın bir süre sonra deneyciler bunu test edebildiler, fakat kesinlikle beklemeye değmişti. Şimdilerdeki kuramsal fikirlerin bir kısmının test edilmesi de en az bir o kadar zaman alabilir, fakat o deneyler bir gün gerçekleştirilebilirse çok daha fevkalade olacaktır. Mesela kuantum kuramının bize ışınlamanın –evet, tıpkı *Uzay Yolu*'ndaki "Işınla beni, Scotty" türünden ışınlamanın– gerçekten mümkün olabileceğini söylediğine inanır mıydınız?

"Beni Gemiye Işınla, Scotty"

Alain Aspect ve meslektaşlarıyla fiilen uygulanan EPR "düşünce deneyi"ni hatırlıyor musunuz? Zıt kutuplanmaya sahip olacak şekilde üretilmiş bir foton çiftinin evrende zıt yönlere uçarken birbirine dolanık bir durumda kalmaya devam ettiklerini göstermişlerdi. Fotonlardan birinin kutuplanması ölçüldüğünde öteki aynı anda çökerek zıt duruma girer. Bu dolanıklık ve uzaktan etki Charles Bennett'in önerdiği kuantum ışınlamasının özünü oluşturur. New York' taki IBM Yorktown Heights Araştırma Merkezi'nden Bennett'in bu fikri 1993'te çok saygın bir dergi olan *Physical Review Letters*'da yayımlanmıştır. Bilimkurguyu andıran dokunuşların yanı sıra bu çalışmanın önemi, ekibin, üstesinden gelinemez gibi görünen bir kuantum sorununun kuantum tekniklerinin kendisini kullanarak nasıl çözüleceğini göstermiş olmasıdır.

Klasik, gündelik hayatta uzak yerlere bir şeylerin kopyalarını göndermek sıradan bir iş. Işınlamayla hemen akla gelen benzetme faks makinesidir, üstelik metnin aslını gönderildiği yerde sapasağlam bir halde bırakarak gideceği yere kopyasını gönderme avanta-

jına sahiptir. Gazeteler ve kitaplar[47] temelde içerdikleri bilgiler açısından tıpatıp aynı kopyalarıyla yüz binlerce basılmaktadır. Fakat kuantum seviyesinde kopyalama güçlüklerle karşılaşır.

İlki sadece bir ayrıntı meselesi. Belirsizlik ilkesi mesela bir dosya kâğıdındaki her atom hakkındaki her ayrıntıyı, hatta kâğıt üzerindeki her bir mürekkep molekülünün tam konumunu bilmeyi imkânsız kılar; dolayısıyla fakslanmış "kopya" sadece bir yakın benzerlik seviyesinde kalır. Ayrıca, bir nesneyi kuantum seviyesinde taramak onun kuantum durumunu değiştirir – kuantum kuramına göre, bir şeye bakma ediminin bizatihi kendisi onu değiştirir. Dolayısıyla, bir kuantum sisteminin kopyasını yapmak için gerekli bilgileri elde etseniz bile, aslı imha olur. Bir anlamda bu, faks makinesinin çalışma tarzından çok bilimkurgudaki ışınlamaya benzer. Bilimkurguda "aslı"nın imha olması genellikle ışınlamanın temel özelliklerinden biridir – ama birkaç hikâyede ışınlama araçlarının insanları birden çok kopyalamasının hoş olmayan sonuçları da ele alınmıştır.

Klasik bilgiler kopyalanabilir, fakat sadece ışık hızında (ya da daha yavaş) iletilebilirler; kuantum bilgisi kopyalanamaz (fizikçilerin esprili bir dille söyledikleri gibi, "tek bir *kuantum* klonlanamaz"), fakat bazen, EPR deneyinde olduğu gibi, bir yerden bir yere anında yayılıyor gibidir. Bennett ve meslektaşları bir sistemin bu klasik ve kuantum özelliklerinin bir karışımını kullanarak kendi ışınlama aygıtlarını önerdiler.

Bunu bir nesneyi ışınlamak isteyen Alice ve Bob adında iki insanla tarif ettiler. Yeni başlayanlar için yapılan bu ışınlamada ışınlanacak nesne sadece belli bir kuantum durumundaki tek bir parçacıktır – bir elektron diyelim mesela. Deneyin başında Alice'le Bob'a dolanık nesne çiftinden bir tanesini içeren birer kutu verilir. Her biri EPR deneyindeki fotonlardan birini (kutuplanmasını ölçmeden) taşıyor gibidir. Sonra evrendeki yolculuklarına çıkarlar. Bir süre sonra –diyelim yıllar sonra– Alice Bob'a başka bir parçacık göndermek ister. Yapması gereken tek şey "yeni" parçacığın dolanık parçacıkla etkileşime girmesini sağlayıp bu etkileşimin sonucunu ölçmektir. Bu, dolanık parçacığın durumunu hem belirler hem değiş-

47. Eh, bu kitap değilse de *bazıları*!

tirir ve aynı anda Bob'un dolanık parçacığının durumunu da eşit oranda belirleyip değiştirir.

Bob bunu henüz bilmiyordur çünkü evrenin başka bir ucundadır. O halde Alice'in ona bir mesaj göndermesi gerekir, belki radyoyla, belki Bob'un her gün okuduğu bir gazeteye ilan yazıp ölçümün sonucunu söyleyerek. Bu mesaj sadece klasik bilgi içerir, o yüzden Alice artık istediği kadar gazete ve radyo yayınıyla, istediği kadar kopya gönderebilir. Nihayetinde Bob mesajı alır. Bob Alice'in iki parçacığının arasındaki etkileşimle ilgili bilgiyle donanınca artık kendi dolanık parçacığına bakıp kendi orijinal parçacığının etkisini mevcut durumundan "çıkarır". Elinde kalan şey *öteki* parçacığın –Alice'in ona göndermek istediği parçacık– tıpatıp kopyasıdır. Alice de bunu Bob'un nerede olduğunu bilmeden, hatta onunla doğrudan konuşmadan yapmıştır. Üçüncü parçacığın aslı, Alice onun üzerinde ölçümlerini yapınca imha olmuştur (başka bir kuantum durumuna girmiştir), o yüzden Bob'un elindeki kopya, bir gazetenin aksine, emsalsizdir ve bunu parçacığın aslı gibi görmeye kesinlikle hakkı vardır. Bu parçacık ona klasik mesajla uzaktan etkinin birleşimiyle taşınmıştır.

Bennett bunun hiçbir fizik kuralını ihlal etmediğini ve ışınlamaya ışık hızından daha küçük bir hızla izin verdiğini vurguluyor – Bob'un, dolanık parçacığını doğru düzgün çözmesi için Alice'in "klasik" mesajına ihtiyacı var, ayrıca parçacığına erken bakarsa kuantum durumunu değiştirir ve artık dolanıklığı doğru şekilde çözme şansını kaybeder. "Alice'in yaptığı ölçüm öteki EPR parçacığının öyle bir şekilde değişmesine neden olur ki, ölçüm sonucu elde edilen klasik bilgi başka birinin içeride meydana gelen şeyin tıpatıp kopyasını yapmasını sağlar"[48] Bu, nükteci birinin dediği gibi, "bir ışınlanma, Jim, ama bizim bildiğimiz türden değil," oluyor. Deneycilerin yaratıcılıklarını hesaba katarsak 40 yıl kadar sonra laboratuvarın bir ucundan öteki ucuna, hatta dünyanın etrafına (evrene değilse bile) bu şekilde elektronlar gönderme şansları yüksek. Hiçbir pratik içerimi olmasa da şık bir numara olacaktır bu. Fakat pratik içerimi de olabilir aslında, bu çalışma için değilse bile kuantum dünyasının gizemlerinin bununla bağlantılı araştırmalarına yö-

48. *Science News*, 10 Nisan 1993.

nelik uygulama alanı muhakkak olacaktır. Bu arada Bennett'in bereketli hayal gücü ışınlamayla kalmamıştır. Öteki başarılarından biri (tabii daha çok IBM'in yararına olan bir başarıdır bu) kuantum mekaniğini kırılamaz bir kod yaratmak için kullanma ihtimaliyle ilgilidir.

Kuantum Kriptografisi

Bahsettiğim şeyin ışınlamayla tabii ki bir bağlantısı var. Işınlanmış parçacık bilgi içerir ve ilke olarak bu bir mesaj olabilir. Dolaşık parçacıkla donanmış olan bir casus bunu amirlerine başka bir parçacık ışınlamak için kullanabilir; tek yapması gereken normal bir dille düz bir mesaj gönderip yeni parçacığın ("mesaj"ın) dolanık parçacıkla etkileşime girdiğinde yaptığı ölçümün sonucunu bildirmektir. Bu normal dille yapılan iletişimi herkes dinleyebilir, fakat ikinci dolanık parçacık olmadan bu bilgi hiçbir işe yaramaz.

Aslında kuantum kanallarını kullanarak çözülemez mesaj gönderme yolları ışınlama çalışmasından önce araştırılmaya başlanmış ve 1980'lerde doruğa ulaşmıştır. Bu soruna farklı yaklaşımlar vardır, fakat hepsi de rasgele sayılardan bir anahtar kullanan kod sistemlerine dayalıdır.

Bu tür kodları casus filmlerinden biliriz. Kodu kullanan iki insan da aynı rasgele sayılara, yani bir telefon rehberi kadar kalın olabilen "defter" denen şeye sahiptir. Mesajı gönderen kişi bunu sayılara çevirir (en basit haliyle 1 rakamına A'yı 2 rakamına B'yi vs. eşleştirerek), sonra da rasgele sayıların olduğu defterden bir sayfa seçer. Defterdeki rakamlar harflere karşılık gelen rakamların altına yazılır ve bu sayı çiftleri toplanır. Sonra bu kodlanmış mesaj defterde hangi sayfanın kullanıldığı bilgisiyle birlikte gönderilir ve öteki uçta kodlanmış mesajdan aynı rasgele sayı dizisi çıkarılarak özgün mesaj bulunur. Bu koda Vernam şifresi denir. Amerikalı Gilbert Vernam bunu Birinci Dünya Savaşı sırasında geliştirmiştir; bazen "tek kullanımlık şifre" olarak da geçer çünkü aynı sayfa sadece bir kere kullanılıp imha edilmelidir (aynı rasgele rakamların olduğu sayfadan aynı sayı dizisi birden fazla mesajda kullanılırsa ortada tekrar eden bir örüntü oluşacağından kod çözülebilir).

Bu tür kodlar eğer araya giren kişide de aynı tek kullanımlık şifre defterinden yoksa çözülemez. Buradaki pürüz, kodla ilgilenen üçüncü şahısların eline, casusluk yapan ajanların çalıştığı bu şartlarda, şifre defterinin geçme ihtimalinin yüksek olmasıdır; daha da kötüsü, üçüncü şahısların şifre defterine sahip olup kod kullanıcılarının haberi olmadan kodu çözüyor olmaları da mümkündür.

Kuantum fiziği iki sorunu da aşmak için bir yol önerir. Kodlanmış mesajların kendisini gizli tutmanın bir yararı yoktur çünkü tıpkı Alice'in Bob'a gönderdiği klasik mesaj gibi kuantum kanalıyla gelen bilgi olmaksızın –bu örnekte "anahtar"– bu mesajların hiçbir anlamı olmaz. Burada Alice'ten Bob'a çözülemeyecek bir şekilde anahtarın kendisini –yani bir dizi rasgele sayıyı– ulaştırmanın bir yolunu bulmak gerekir. İşleri mümkün olduğunca kolaylaştırmak için bu sayı dizisi ikili aritmetik sistemine göre olabilir, yani bilgisayarların kullandığı kod gibi 0'lardan ve 1'lerden oluşan bir dizi; böylece kod herhangi bir açık/kapalı, ya/ya da sinyal sistemiyle gönderilebilir.

Bennett ve meslektaşları bunun kutuplanmış ışıkla yapılabileceğini gösterdiler. Bu tekniğe göre Alice Bob'a bir foton akımı gönderir. Bu fotonlar ya yukarı ya da kararlaştırılmış (ve aralarında 45 derece açı olan) iki yönelimden biriyle kutuplanmış olur, fakat her bir fotonun kutuplanması rasgeledir. Bob gelen fotonların kutuplanmalarını ölçer, fakat her ölçümde detektörünü daha önce kararlaştırılan kutuplanma yönlerinden sadece birine göre dizebilir – yine rasgele seçilmiş olarak. Her bir durumda detektörüne göre ya dikey (ikili sisteme göre 1) ya da yatay (ikili sisteme göre 0) kutuplanmaya karşılık gelen bir "cevap" alacaktır. Ardından Alice'e her ölçüm için hangi yönelimi kullandığını söyler, o da Bob'a bunlardan hangilerinin fotonların gönderiliş biçimiyle örtüştüğünü söyler (bu iletişim kartlı telefonla olabilir). Sonra Bob'la Alice Bob'un "yanlış" kutuplanma seçtiği bütün ölçümleri atarlar, geriye ikili sisteme göre 1'lerden ve 0'lardan oluşan güvenli anahtarları kalır. Böyle anlatıldığında çok zahmetli bir işlemmiş gibi gelebilir, fakat gerçek dünyada böyle bir sistem kullanan herkes işin angarya kısmını halleden bir bilgisayarla bu zahmetten kurtulacaktır.

Bu tekniğin en güzel yanı, üçüncü şahısların kullanılan kodu bulmasının tek yolunun kuantum iletişim kanalını "dinlemesi" ve

fotonlar geçtikçe kutuplanmalarını ölçmesidir. Fakat bir fotonun kutuplanmasını ölçme eylemi, önce de gördüğümüz gibi, onun kutuplanmasını değiştirir! Gizli kulak fotonu ölçüp Bob'a gönderse bile, foton rasgele bir değişime uğramış olacaktır. Bob'la Alice bunu standart tekniklerle kontrol edebilir. Bu da, bütün anahtarı ortaya çıkarmadan anahtarın her beşinci, yedinci ya da bilmem kaçıncı harfini karşılaştırmak demektir.

Bütün bunlar zorlama ve olmayacak şeyler gibi gelebilir; fakat Bennett ve meslektaşları gerçekten böyle çalışan bir sistem kurdular. Tabii prototipte kodlu mesajlar sadece 30 cm'lik bir mesafeye gönderildi; ama bunun sebebi sistemi bir masanın üzerine kurmuş olmalarıydı. İlke olarak, kutuplanmış fotonlar optik kabloyla birkaç kilometre uzağa değişmeden gönderilebilir. Üstelik John Logie Baird de ilk televizyon yayın cihazını yaptığında sadece birkaç metre uzağa resim göndermişti.

Kuantum kriptografları, anahtarlarını iletmenin daha iyi yollarını bulmak için çoktan iş başındalar. Oxford Üniversitesi'nden Artur Ekert (Bennett'le de birlikte çalışmıştır) gerekli rasgele sayı dizisinin EPR deneyinin bir çeşitlemesinden nasıl elde edileceğini göstermiştir. EPR fotonları uygun biçimde dolanık fakat henüz ölçülmemiş olarak ters yönde fırlatılır, bir ışık demeti Alice'e, biri de Bob'a. Alice ve Bob'un her ikisi de rasgele yönelimi olan detektörleri daha önceden kararlaştırılmış bir yön dizisiyle birlikte kullanarak kendi fotonlarını ölçebilirler. Sonra birbirlerine herhangi bir açık iletişim yoluyla hangi ölçümleri yaptıklarını söyleyebilirler, ama bu ölçümlerin sonuçlarını *değil.* Son olarak, farklı yönelimler kullandıkları ölçümleri atarlar ve kutuplanma detektörlerinin aynı şekilde dizildiği –tabii her bir EPR fotonunun ölçümden sonra zıt kutuplanmaya sahip olduğu, yani Alice'in 0 bulduğu yerde Bob'un 1 bulduğu ya da tersi durumu hesaba katılmıştır– ölçümlerin sonuçlarından güvenli anahtarlarını bulurlar. Ve yine, fotonlara Bob ve Alice'e gitmeden önce bakılarak kuantum iletişim kanalının gözetleme girişimi, kutuplanmalarını tespit edilebilir biçimde karıştıracaktır.

Bu örneklerin de gösterdiği gibi fotonların kuantum özellikleri artık pratik yararları olacak biçimde kullanılıyor – henüz ticari olarak raflarda yerini almış kuantum kod makineleri ya da ışınlama cihazları olarak değil ama masaüstü prototiplerin başlangıcı olarak.

Dolayısıyla, fotonların gerçekliği, ışığın hem dalga hem de parçacık olarak davranması su götürmez bir olgu. Deneyciler o tuhaf kuantum özelliklerini gündelik mühendislik dünyasına getirirken, başka deneyler fotonu "içten" inceleyerek onun parçacık doğasının basit resmini bozuyorlar. Görünüşe göre kuantum belirsizliği sayesinde fotonun içinin bile parçacıkların kaynadığı bir kütle olarak düşünülmesi gerekiyor. Sonuçta fotonun boşluktan daha fazla enerjisi vardır – dolayısıyla eğer boşluk sanal parçacıklarla dolu olabiliyorsa foton neden olmasın?

Fotonun İçi

Şu ana kadar açıkladığım şekliyle fotonlar sadece elektromanyetik kuvvetin etkileri sayesinde başka parçacıklarla etkileşime girebilen basit varlıklardır. Fotonlar elektromanyetizmadan "yapıldığına" göre başka nasıl olabilirdi ki? Ama kütle çekiminin (çok zayıf olan bu kuvvet atomaltı parçacıklar için genellikle göz ardı edilebilir) ve elektromanyetizmanın yanı sıra atomaltı seviyesinde etki eden iki kuvvet daha vardır. Zayıf nükleer kuvvet, radyoaktiflik ve nükleer bozunmaya yol açan çekirdeklerin davranışıyla ilgilidir, güçlü nükleer kuvvet de atom çekirdeğini (protonlarla nötronlar) meydana getiren parçacıkları bir arada tutar. Aslında protonla nötronun kendilerinin de kuark adı verilen daha temel varlıklardan meydana geldiği düşünülüyor ve güçlü kuvvet kuarklar arasında etkili oluyor. Her şey gayet açık ve net görünüyor. Ne var ki, yüksek enerjili fotonların protonlarla etkileştiği bazı deneylerde fotonların kendisinin de güçlü kuvvetten etkilendiği gözleniyor – sanki sadece protonun üzerindeki elektrik yükünü değil, protonun içindeki kuarkları da "hissediyor"larmış gibi.

Fotonları içeren bu fazladan etkinlik katmanına dair iç gıcıklayan ipuçları Hamburg'un hemen dışında bulunan Desy laboratuvarındaki bilim insanlarını 1990'larda fotonları içeren çok-yüksek-enerji deneyleri yapmaya teşvik etmişti. Bu deneyler fotonların gerçekten de içeride bir kuark, elektron ve başka parçacıkların karmasından oluşan kompleks varlıklar gibi davrandıklarını göstermiştir. Bunun açıklaması boşluğun kuantum doğasının açıklamasıyla ta-

mamen aynıdır. Bir fotonun taşıdığı enerji miktarındaki belirsizlik kısa bir süreliğine onun bir kuark-karşıkuark çiftine (ve başka şeylere) dönüşmesine izin verir, tıpkı boşlukta sıfır enerji noktasındaki belirsizliğin, (başka şeylerin yanı sıra) elektron-pozitron çiftinin varoluşa girip çıkmasına izin vermesi gibi. Eğer foton bu durumdayken bir protonla çarpışırsa, fotonun "içindeki" kuarklar, protonun içindeki kuarklarla doğrudan etkileşime geçip standart tekniklerle tespit edilebilecek başka parçacık yağmuru üretirler.

Bunlar yeni keşifler. İçerimleri hâlâ sorgulanıyor ve deneycileri gelecek yıllarda meşgul etmeye devam edecek. Ama bu keşfin esas özelliği zaten ortada. Işığın tanımında dalga-parçacık ikiliği kavramını kabullenmek için mücadele verdikten sonra şimdi de ışığın Planck zamanı cinsinden, yani saniyenin 10^{43}'te biri gibi bir sürede kendisinin de maddeye dönüşebileceği ve sonra tekrar ışık olacağı fikrini kabullenmemiz gerekiyor.

Bu davranış garip olsa da kuantum dünyasının güçlü bir özelliğine, yani ışık ve maddenin, dalga ve parçacığın hoş simetrisine katkıda bulunur. Uygun şartlar altında iki delik deneyinin denginde "aynı anda iki ayrı yöne" gidip normalde ışık dalgalarından beklediğimiz biçimde girişim yapan atomlarla zaten tanışmıştık; o halde ışık "dalgaları"nın sadece bir tür özel parçacık (foton) olarak davranmasına değil, aynı zamanda uygun şartlarda atomların, nihayetinde yapı taşları olan parçacıklar gibi davranmasına da izin verecek kadar geniş fikirli olmamız gerekir.

Peki, atomlar da dahil madde parçacıkları nasıl *davranırlar*? Kimse bakmazken –konumları ya da başka özellikleri bir deneyde ölçülmezken– bir anlamda parçacık olarak gerçekten var olmadıklarını öğrenmiştik. Kuantum varlıkları, olasılık dalga fonksiyonlarının çökmesine dışarıdan bir şey sebep olmazsa, durumların üstüste-binmesi olarak tarif edebileceğimiz bir halde var olurlar. Fakat parçacığa bakmayı hiç durmadan *sürdürürsek* ne olur? MÖ 5. yüzyılda yaşamış Yunanlı filozof Elealı Zenon'un meşhur paradoksunun bu modern biçiminde, seyredilen bir atom kuantum durumunu asla değiştiremez. Atomu kararsız, uyarılmış yüksek enerjili bir durumda bile hazırlamış olsanız (daha önce anlatılan paradoksal deneydeki tek fotonları yapmak için kullanılan atomlar gibi) seyretmeye devam ettiğiniz takdirde atom o durumda sonsuza dek kalır.

Uçta titreyip durur ama ancak kimse bakmadığında daha kararlı düşük enerjili bir duruma atlayabilir. Seyredilmeyen bir kuantum varlığının bir "parçacık" olarak var olmayacağı fikrinin mantıki sonucu olan bu fikir 1970'lerin sonlarından beri bilinmekteydi. Kurama göre seyredilen bir kuantum kazanı asla kaynamaz. 1990'ların başında yapılan deneyler de bunu kanıtlamıştır.

Kuantum Kazanını Seyrederken

Zenon imkânsızı "ispat eden" bir dizi paradoks sunarak gündelik hayatta kullandığımız zaman ve hareket fikirlerinin yanlış olması gerektiğini gösterdi. Örneklerden birinde kaçan bir geyiğin arkasından bir ok atılır. Zenon'a göre, ok aynı anda iki yerden birde olamayacağından zamanın her anında havada okçuyla geyik arasında belli bir yerde olmak zorundadır. Fakat ok tek, belirli bir yerdeyse, hareket etmiyordur. Eğer ok hareket etmiyorsa geyiğe yetişemez.

Oklar ve geyiklerle uğraşıyorsak Zenon'un vardığı sonucun yanlış olduğu su götürmez. Tabii Zenon bunu biliyordu. Bu "paradoks" yardımıyla dikkat çektiği soru bunun *neden* yanlış olduğuydu. Bu muamma yüksek matematik teknikleri kullanılarak çözülebilir çünkü yüksek matematik okun belli bir anda sadece konumunu değil, o anda konumunun değişme şeklini de tarif eder. Başka bir seviyede, kuantum fikirleri bize herhangi bir anda okun kesin konumunu ve kesin hızını bilmenin mümkün olmadığını söyler (bu arada, zamanın kendisinin de belirsizliğe maruz kalmasından dolayı "kesin an" gibi bir şeyin de olmadığını söyler). Böylece argümanın uçlarını törpüleyip oku uçmaya bırakır. Fakat Zenon'un ok argümanının bir eşdeğeri birkaç bin tane berilyum iyonunun bulunduğu bir "kazan" için gerçekten geçerlidir.

İyon aslında bir ya da fazla elektronun koparıldığı bir atomdur. Bu da iyonu toplamda pozitif yüklü yapar ve bu sayede elektrik alanlarıyla iyonları yakalamak ve tek bir yerde, bir tür elektrik kapanında –kazanda– tutmak mümkün olur. Colorado Boulder'daki ABD Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü'ndeki araştırmacılar bir kazan berilyum iyonunu kaynatmanın ve kaynarken de seyretmenin yolunu buldular – ama o zaman kaynama durdu.

Deneyin başında iyonların hepsi aynı kuantum enerji seviyelerindeydi. Ekip buna 1. Seviye adını verdi. İyonlara tamı tamına 256 milisaniye boyunca belli bir frekansta radyo dalgaları püskürterek bütün iyonları 2. Seviye dedikleri daha yüksek bir enerji seviyesine getirdiler. Bu kaynayan kazana eşdeğerdi. Fakat iyonlar gerçekten bir kuantum durumundan ötekine nasıl ve ne zaman geçiş yapmışlardı? Hatırlarsak durumları ölçüldüğünde sadece hangi durumda olduklarına karar veriyorlardı – birisi iyonlara bakınca mesela.

Kuantum kuramına göre geçiş ya hep ya hiç türünden bir şey değildir. Bu deneydeki belirli zaman aralığı 256 milisaniye olarak seçilmişti çünkü bu süre söz konusu sistem için karakteristik zamandır; bu süreden sonra bir iyonun 2. Seviyeye geçiş yapma olasılığı neredeyse yüzde yüzdür. Başka kuantum sistemleri farklı karakteristik zamanlara sahiptir (radyoaktif atomların yarı-ömrü konuyla ilgili bir kavramdır), fakat genel davranış modeli aynıdır. Bu örnekte 128 milisaniye sonra (geçişin "yarı-ömrü")[49] tek bir iyonun geçişi yapması ile hâlâ 1. Seviyede kalması eşit olasılığa sahiptir. İki durumun üst üste binmesi söz konusudur. Olasılık 256 milisaniye içinde yüzde yüz 1. Seviyeden, aşama aşama yüzde yüz 2. Seviyeye değişir. Arada herhangi bir zamanda iyon uygun bir olasılık karışımıyla durumların uygun bir üst-üste-binmesi halindedir. Fakat gözlemlendiği zaman bir kuantum sistemi şu ya da bu durumda olmak zorundadır; asla durumların bir karışımını "göremeyiz".

Eğer iyonlara 256 milisaniyenin yarısında bakabilsek, kurama göre iki olası durumdan birini seçmek zorunda kalırlar, tıpkı Schrödinger'in kedisinin kutusuna baktığımızda ölü mü canlı mı olduğuna "karar vermek" zorunda olması gibi. Eşit olasılıklarla iyonların yarısı bir yana, öteki yarısı başka bir yana gidecektir. Ne var ki, kutudaki kedi deneyinin aksine bu kuramsal öngörü fiilen deneyle test edilmiştir, aynen Newton'un isteyeceği gibi.

Ulusal Standart ve Teknoloji Enstitüsü ekibi iyonlar hangi durumda olacaklarına karar verirken onlara bakacak şık bir teknik geliştirdiler. Ekip bunu kuantum kazanına çok kısa bir süreliğine la-

49. Radyoaktif yarı-ömürle olan analoji tam değil, çünkü bu durumda geçiş radyo dalgalarıyla dışarıdan "pompalanmaktadır", işte o yüzden *bütün* iyonlar tam 256 milisaniye içinde geçiş yaparlar.

zer ışığı göndererek yaptı. Lazer ışığının enerjisi kazandaki iyonların enerjisine denk düşürüldü, öyle ki, 2. Seviyedeki iyonları etkilemeden bıraktı, fakat 1. Seviyedeki iyonları daha yüksek bir enerji durumuna, 3. Seviyeye atlattı. Buradan hemen (bir milisaniyeden çok daha az bir sürede) tekrar 1. Seviyeye düştüler. Geri düşerken bu uyarılmış iyonlar karakteristik fotonlar yaydılar. Bunlar tespit edilip sayılabiliyordu. Fotonların sayısı lazer ışını vurduğunda 1. Seviyede kaç iyon olduğunu araştırmacılara söylüyordu.

Elbette, iyonlara 128 milisaniye sonra lazerle "bakıldığında" 1. Seviyede sadece yarısı bulundu. Fakat deneyciler 256 milisaniye boyunca eşit aralıklarla dört kere "göz attıklarında" deneyin sonunda iyonların üçte ikisi *hâlâ* 1. Seviyedeydi. Ve 64 kere göz attıklarında (her 4 milisaniyede bir), neredeyse bütün iyonlar hâlâ 1. Seviyedeydi. Radyo dalgaları iyonları canlandırmak için ellerinden geleni yapmış olsalar da, seyredilen kuantum kazanı kaynamaya direndi.

Bunun sebebi 4 milisaniye sonra bir iyonun 2. Seviyeye geçiş yapmış olma olasılığının sadece yüzde 0.01 olmasıdır. İyonla ilintili olasılık dalgası çoktan yayılmış, fakat çoğunlukla hâlâ 1. Seviyeye karşılık gelen durum üzerinde yoğunlaşmıştır. Dolayısıyla, iyonlara göz atan lazer, haliyle, yüzde 99.99'unun hâlâ 1. Seviyede olduğunu görür. Fakat bundan daha fazlasını yapmıştır. İyona bakma eylemi onu bir kuantum durumunu seçmeye zorlamıştır, böylece bir kere daha tamamıyla 1. Seviyededir. Kuantum olasılık dalgası yine yayılmaya başlar, ama 4 milisaniye sonra gelen yeni bir bakış onu yine 1. Seviyeye düşmeye zorlar. Dalganın başka bir gözlem onu tekrar 1. Seviyeye atmadan önce daha ileri gitme şansı hiç yoktur ve deneyin sonunda iyonların gözlenmeksizin 2. Seviyeye geçme fırsatı hiç olmamıştır.

Bu deneyde bir iyonun gözlemlenmediği sırada 4 milisaniyelik aralıkta çok minik de olsa geçiş yapma olasılığı hâlâ vardır, ama sadece 10 000 iyondan bir tanesi bunu yapar; USTE deneyinin sonuçlarıyla kuantum kuramının öngördükleri arasındaki yakın benzerlik şunu gösteriyor: Eğer iyonları sürekli izlemek mümkün olsaydı o zaman hiçbiri değişmeyecekti. Kuantum kuramın ima ettiği gibi dünya sadece ve sadece gözlemlendiği için varsa, o zaman dünyanın ancak sürekli gözlemlendiği için değiştiği de doğrudur.

Bu da eski felsefi bir soruya merak uyandırıcı bir ışık tutar: Bir

ağaç kimse bakmazken gerçekten orada mıdır, değil midir? Ağacın süreğen gerçekliğini savunan geleneksel savlardan birine göre, ağaca bir insan gözlemci bakmasa bile tanrı sürekli bakar; fakat son bulunan delillere göre ağacın büyümesi ve değişmesi için tanrının bile göz kırpması gerekir, biraz da çabukça!

Demek ki sürekli seyrederek iyonları sabit bir kuantum durumunda donmuş olarak "görebiliriz". Ayrıca, IBM'in Kaliforniya'da bulunan Almaden Araştırma Merkezi'ndeki araştırmacılar sayesinde elektronların davranışını belirleyen olasılık dalgalarını da "görebiliyoruz".

Büyük Elektronik Ağıl

Elektron dalgasını iş başında gösteren en net örnek 1990'larda Almanya'da Tübingen Üniversitesi'nde çalışan Franz Hasselbach ve meslektaşları tarafından geliştirilmiştir. Hasselbach ve meslektaşları elektron interferometresi denilen bir aygıtın hassaslaştırılmış halini kullanmışlardır. Bu aygıtın kendisi de zaten 1950'lerin ortalarında Tübingen'de icat edilmişti.

Elektron interferometresi iki delik deneyinin versiyonlarından biridir. Elektronlar bir demet halinde negatif elektrik yüklü bir tele doğru gönderilir. Teldeki negatif yük elektronların negatif yükünü iter. Bu aygıt tam bir simetri içinde tasarlanmıştır, o yüzden elektronların tamı tamına yüzde 50'si telin bir yanından yüzde 50'si öteki yanından geçer. İleride pozitif yüklü bir tel vardır, o da iki yandan giden elektronları çekerek birleştirir ve tekrar tek bir yol üzerinde gitmelerini sağlar. Son olarak, bir detektör bir perdeye gelen elektronları sayar, tıpkı daha aşina olduğumuz iki delik deneyindeki gibi.

İnterferometreden teker teker gönderilen elektronlar öteki uçtaki perdede girişim örüntüsü oluştururlar, adeta her elektron ilk telin başında ikiye ayrılmış, sonra ikinci telde iki yarım elektron birleşmiş ve birbiriyle girişim yapmış gibidir (herhalde buna şaşırmamışsınızdır; şu noktada, elektronların böyle *davranmadığını* söyleseydim şaşırmanız gerekirdi). Buraya kadar anlattıklarım, epey incelikli de olsa, iki delik deneyinin başka bir türüydü. Fakat 1992'de Tübingen ekibi bir ince ayar daha yaptı.

Bu deney dizisinde elektron interferometresine Wien filtresi denen bir cihaz eklendi. Wien filtresi aralarında bir boşluk bulunan iki adet elektrik yüklü plaka (fiilen bir kondansatör) ile bu aralıktan dik açılarla geçen manyetik bir alandan oluşur. Filtreden geçen yüklü parçacıklar, örneğin elektronlar, hem elektrik hem de manyetik alanı "hissederler"; iki alan öyle dengelenmiştir ki filtreden geçen herhangi bir yüklü parçacık hafif sapacaktır, tabii parçacık filtrenin kurulum şekline karşılık gelen belirli bir süratte hareket etmiyorsa. Araştırmacılar orijinal deneyin simetrisini elektron interferometresinin iki yüklü teli arasına Wien filtresi yerleştirerek öyle bozdular ki, "ayrılmış" elektron demetinin yarısı geçerken bir tür asılma hissedecek, diğer yarısı hissetmeyecekti. Sonuç olarak, elektron dalgasının yarısı interferometreden daha hızlı geçip öteki yarısından ayrı faza düşecekti. Bu, perdede oluşan girişim örüntüsünü tamamen kuantum kuramının öngördüğü biçimde değiştirmişti – üstelik elektronlar interferometreden teker teker geçtiğinde de aynı sonuç alındı. İşte elektronların dalga gibi davrandığına dair başka bir kanıt, fakat bu, dalgaların kendisini "görmek"le pek aynı şey değil. O numara ancak 1993'te IBM araştırmacıları kuantum ağılındaki ilk toplamayı gerçekleştirdiklerinde başarıldı.

Kuantum dalgasının gerçekliğine dikkat çekmenin yanı sıra bu tekniğin uygulama alanı da vardır, çünkü tek atomları kontrol etme ve bir yüzey üzerinde toplamayı da içerir – "nanoteknoloji", çok geçmeden daha küçük, daha hızlı, daha etkin bilgisayarların gelmesini sağlayabilir. Bunun dışında bazı bilim insanlarının inandığı gibi yeni bir sanayi devriminde toplumu dönüştürecek başka (mikroskopla göremeyeceğimiz kadar küçük) insan icatlarını da getirebilir. IBM araştırmacıları taramalı tünelleme mikroskopu (STM) denilen bir alet kullanarak metrenin 14 milyarda biri çapındaki[50] kusursuz bir daire biçimindeki halkanın içinde bulunan düz bakır bir yüzeye 48 demir atomu koydular. Bu onların "kuantum ağılı"ydı. Demir atomlarından oluşan bir halkanın içindeki bir elektron için bu atomlar nüfuz edilemez dairesel bir duvar oluştururlar, kuantum kuramına göre de halka içindeki elektron dalgaları duvardan yansıyıp bir

50. Metrenin milyarda birine nanometre denir. Önek "nano" Yunanca cüce anlamındaki *nanos*'tan gelir, nanoteknoloji terimi de buradan.

durağan dalga oluşturur – zaman içinde donmuş halkacıklardan oluşan bir örüntü, aynı notayı hiç durmadan çalan bir gitarın teli gibi.

En azından kuantum kuramı böyle söylüyor. Kuantum ağılı içinde herhangi bir yerdeki elektronların yoğunluğu STM kullanarak ölçülebilir ve bu ölçümler, elektronları doğrudan görebilecek gözlerimiz olsaydı karşılaşacağımız örüntüyü gösteren bir resme dönüştürülür. Bu resim, gölcüğe atılmış bir taşın etrafını çevreleyen halka dalgacıkların fotoğrafıyla aynıdır – elektronların durağan dalgasının ta kendisi.

Elektronların dalga gibi davrandığı görülüyor. Önsöz'de gördüğümüz gibi atomlar bile iki delik deneyinin çeşitlemelerinde dalga gibi davranıyorlar. Ama yine de Seattle'daki Washington Üniversitesi'nden Hans Dehmelt'in hem tek tek elektronları, hem de tek tek atomları manyetik "kutular"da (Zenon'un paradoks deneyinde kullanılan "kuantum kazanı" gibi) yakalamak ve parçacık olarak davranırken seyretmek için nihayetinde başarılı olan öncü gayretlerinden dolayı Nobel Ödülü kazandığını (1989'da) belirtmekte yarar var. Tek bir elektronu bu şekilde kapana kısılmış olarak doğrudan "görmenin" hiçbir yolu yok. Fakat 1980'lerde Dehmelt ve meslektaşları bu "Penning kapanları"nın değiştirilmiş örneklerinden birinde bir baryum atomunu kapana kıstırmakla kalmayıp, yaydığı doğal mavi ışıkla atomun gerçekten resmini çektiler. Fotoğraftaki uçsuz bucaksız siyahın içinde minik mavi bir nokta olarak görünüyordu; eğer fotoğrafın kendi gözlerinizle görmek kadar geçerli olduğunu kabul etmeye yanaşırsanız (hem zaten uzaktaki galaksiler ve evrendeki başka nesnelerin neye benzediğini de ancak fotoğraf aracılığıyla biliyoruz), artık bir atomu tek başına görmek mümkün.

Ne var ki felsefecilerin ve kuantum yorumcularının, atom kimse fotoğrafını çekmezken hâlâ orada mıdır diye tartışmaya devam etmeleri mümkündür. Sanırım kuantum dünyasının garip gerçekleri hakkında yeterli örnek verdim, artık şimdi söz verdiğim gibi kuantum gerçekliğinin aslında ne olduğunu açıklama zamanı geldi. Fakat kuantum gerçekliğine ilişkin mevcut yorumlara girmeden önce –dışarıdan bakanlar için bunların çoğu son çare ya da çaresizlikten doğmuş yorumlar gibi görünebilir– ışığın garip davranışına iki örnek daha vererek, açıklamaya çalıştığımız şeyin ne olduğuna dair net bir tablo çizmek istiyorum.

Foton Ne Zaman?

Son birkaç yılda kuantum fiziğinin geliştirdiği hoş özelliklerden bir tanesi, "düşünce deneyi" olarak tasarlanmış ve aslında genellikle uygulanması hiç düşünülmemiş fikirleri kuantum dünyasının garipliklerini canlı bir şekilde gösteren fiili deneylere dönüştürmüş olmasıdır. İlk örnek tabii ki EPR deneyidir. Bu deneyi kavram olarak John Bell uyarlamış ve fiili olarak da Alain Aspect ekibi gerçekleştirmiştir. Bu örnekte düşünce deneyinin gerçekleştirilmesi yarım yüzyılı almıştır. Fakat başka örneklerde deney gelişmeleri çok daha çabuk olmuştur.

Richard Feynman'ın tez danışmanı John Wheeler 1970'lerin sonunda Texas'ta Austin Üniversitesi'ndeyken oldukça ilginç bir öneri sundu. *Schrödinger'in Kedisinin Peşinde*'de, deneyin birkaç yıl içinde gerçekten yapılacağının farkında olmaksızın "gecikmiş seçim" düşünce deneyinden söz etmiştim; 1980'lerin ortalarında deneyin bu versiyonunun fiilen gerçekleştirilebileceğini kimse düşünmüyordu; fakat 1990'ları ortaladığımız şimdilerde, Wheeler'ın bundan 20 yıldan daha az bir zaman önce düşünce deneyi olarak ele aldığı kuasar ışığının ölçümlerinin gerçekleşme ihtimali büyük gibi görünüyor.

Gecikmiş seçim deneyinin temel özelliği iki delik deneyinin bir çeşitlemesi olmasıdır. Fotonların deneyde her seferinde teker teker gönderilmesi halinde deneyin öteki ucunda hâlâ bir girişim örüntüsü oluşturduğunu zaten biliyoruz. Görünüşe göre her bir foton deney düzeneğinde iki yoldan birden geçip kendisiyle girişim yapar. Ayrıca, fotonların iki yarıktan hangisinden geçtiğini izlemek için bir sistem kurduğumuzda tek tek fotonların ya bir delikten ya da ötekinden geçtiğini de biliyoruz – ve bu durumda sondaki perdede girişim oluşmaz. Yarıklardaki fotonların davranışı bizim onlara nasıl baktığımıza bağlı olarak değişmiştir.

Wheeler fotonların geçişini arada bir yerde, iki yarıkla ötedeki perde arasında izlemenin ilke olarak mümkün olduğunu ileri sürüyordu. Delikleri geçtikten *sonra*, ama perdeye düşmeden *önce* parçacık olarak mı yoksa dalga olarak mı davrandıklarını görmek için

fotonları izleyebilirdik. Kuantum kuramına göre bir fotonu kanallardan birinde tespit edince bütün deneyin dalga fonksiyonu çöker ve girişim örüntüsü oluşmaz; fakat detektörü fotonlar uçarken kapatıp onlara bakmamayı seçersek girişim örüntüsünü tekrar elde ederiz. Işığın deliklerdeki davranışı delikleri geçtikten sonra belirlenir. Sadece bu değil, Wheeler'ın işaret ettiği gibi, detektörleri açıp açmamaya ışık delikleri geçtikten sonra karar veririz – gecikmiş seçim adı da buradan gelir.

Schrödinger'in kedisi hikâyesi gibi bu deney de kuantum mekaniğinin saçmalığını gözler önüne serer. Fakat Schrödinger'in kedisi deneyinin aksine bu deney 1980'lerin ortasında biri Maryland Üniversitesi'nde, diğeri Münih Üniversitesi'nde olmak üzere birbirinden bağımsız iki grup tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar bir lazer ışınını ışık bölücüyle ikiye böldükleri bir çeşitlemeyi kullandılar. Bu deneyde bölünmüş lazer ışınından bir tanesi faz kaydırıcı denilen bir cihazdan geçer, böylece öteki yarım ışınla (bilinen bir miktarda) fazdan çıkar ve sonra yarım ışınlar tekrar birleşip girişim örüntüsü oluştururlar (bu, Tübingen deneyinde elektronların "ikiye ayrılma" ve fazlarının kaydırılma şekliyle tamamen aynıdır). Bir yanda, ayrılmış ışınların her birine fotonların geçişini izlemek için Pockels hücreleri denilen detektörler yerleştirilirken, öte yanda deneyin uzak ucundaki detektörler yeniden birleştirilen ışına bakarak girişim oluşturup oluşturmadığını görebilir.

Pockels hücreleri çok hızlı açılıp kapanabiliyordu, yaklaşık saniyenin 9 milyarda birinde. Fakat her bir ışının ışık bölücüden detektörlere giden yolunun uzunluğu yaklaşık 4.3 metreydi ve bir fotonun ışık hızıyla bu mesafeyi kat etmesi saniyenin 14.5 milyarda biri kadar sürüyordu. Bu sayede Pockels hücreleri, ışın ışık-bölücüyü geçtikten *sonra* açılabilirdi (ya da kapanabilirdi – ve tabii açma/kapama kararı bir bilgisayar tarafından verilecekti, rasgele, hiçbir insan müdahalesi olmadan). İki grup araştırmacı da kuantum kuramıyla uyumlu sonuçlar elde etti. Detektörler açıkken ışık parçacık gibi davrandı. Her bir foton iki yoldan birinden geçti ve girişim oluşmadı (tabii 4.3 metrelik bir foton demetinde pek çok foton bulunur, her biri detektöre gelmeden nasıl davranacağına "karar vermek" zorundadır). Detektörler kapalıyken ışık dalga gibi davrandı, hatta ışık bölücüye fotonlar tek tek fırlatıldığında bile. Görü-

nüşe göre iki yolu da takip eden ışık kesinlikle bir girişim oluşturdu. Fotonların ışık bölücüdeki davranışı onlara nasıl *bakacağımıza* bağlı olarak değişti, *hatta onlara nasıl bakacağımıza daha kendimiz karar vermeden bile önce*!

Bu, bir düşünce deneyinin gerçeğe dönüşmesine dair etkileyici bir örnek, fakat fotonlar detektörlere geldiklerinde detektörlerin açılacak ya da kapanacak olmasını önceden tahmin etme yetenekleri sadece saniyenin birkaç milyarda biri kadar bir süreyi kapsar, o yüzden böylesi mütevazı bir "önceden bilme" konusunda fazla endişe etmenize gerek yok. İşte Wheeler'ın, bu düşünce deneyinin kozmik versiyonuna ilişkin 1980'lerin başında geliştirdiği tasarısı burada devreye giriyor.

Wheeler kütle çekimsel mercek etkisi diye bilinen fenomenin, iki delik deneyinin –bu örnekte iki yol– bir kozmik versiyonunu oluşturabileceğini ifade etti. O sırada uzaktaki kuasarların kütle çekimsel mercek etkisinin dünyadaki teleskoplarla tespit edilip edilmeyeceğinden kimse emin değildi, fakat o günden bugüne bu fenomenin çeşitli örnekleri keşfedildi. Burada olan şey şudur: Milyarlarca ışık yılı uzağımızdaki bir kuasardan gelen ışık bu uzun görüş hattının üzerinde bulunan bir galaksinin yanından geçer (bir ışık yılı, ışığın bir yıl boyunca kat edeceği yoldur; daha iyi anlamak için ışığın güneşten bize ulaşmasının 500 saniyeden az sürdüğünü hatırlayalım, ki bu da 150 milyon km mesafedir). Eğer galaksi ve kuasar uygun biçimde hizalanmışsa, galaksinin kütle çekimi ışığı geçerken bükecektir, böylece galaksinin etrafında kuasardan gelen fotonlar iki seçenekle karşılaşır (tek bir elektronun elektron interferometresinde elektrik yüklü telle karşılaştığında sahip olduğu yol seçenekleri gibi) ve kuasarın iki resmini oluşturur, dünyadan görüldüğü haliyle her biri galaksinin resminin bir yanını gösterir.

İlke olarak, iki resimden gelen ışığı birleştirerek dünyada girişim örüntüsünü oluşturmak mümkün. Bu, ışığın araya giren galaksinin iki yanından da geçerek gelen bir dalga gibi davrandığının "kanıt"ı olurdu. Öte yandan kuasarın iki resminden dünyaya ulaşan fotonları izlemek için Pockels hücreleri (ya da benzer bir şey) kullanmak da mümkün. Bu durumda kuantum kuramına göre iki resimden de gelen fotonlar Pockels hücreleriyle izlendikten sonra bir perdede bir araya getirilirse girişim örüntüsü oluşturmayacaklardır.

Bu da ışığın parçacık olarak davrandığının "kanıt"ı olacaktır. Her bir foton araya giren galaksinin şu ya da bu yanından geçmiştir.

Bu düşünce deneyini gerçek bir uygulamaya dönüştürmedeki pürüz (1980'de kimsenin bunu düşünce deneyinden başka bir şey olarak düşünmemesinin sebebi) şu ki, kuasarın iki resminden de fotonlar yakalayabilsek de, ışığı büken galaksi çok büyüktür ve iki ışındaki bilgiyi bulanıklaştırır. Bütün ışık kaynaklarında, yaydıkları ışık dalgalarının "uygun adım" gittiği bir "uyarlık zamanı" vardır. Daha uzun zaman zarflarında dalgalar rasgele ve tahmin edilemez biçimde uygun adımdan çıkar. Bir galaksinin etrafındaki iki yolun arasındaki mesafe farkı birkaç ışık haftası kadardır ve bu da bir kuasardan gelen ışığın uyarlık zamanından çok daha fazladır. O yüzden ışıktaki bilgi karman çorman olur ve yeryüzünde bir girişim örüntüsü oluşturmak için kullanılamaz.

Ne var ki, 1993'te astronomlar başka bir tür kütle çekimsel mercek etkisinin keşfedilme haberiyle heyecanlandılar. Bu habere göre, başka bir galaksideki bir yıldızın önünden geçen kendi galaksimizdeki görünmeyen devasa bir nesne, yıldızın farklı kütle çekimsel mercek etkili resimleri görüş alanından geçerken uzaktaki yıldızı "kırpıştırmıştı". Bu devasa nesneler muhtemelen Jüpiter gezegeninden daha büyük değildir, keza yollar arasındaki fark da galaksi kütle çekimsel mercek etkisindekinden çok daha azdır. Gözlemler gelişip teleskop teknikleri daha hassas hale geldiğinde uzaktaki yıldızlardan, hatta kuasarlardan gelen ışıkta girişim örüntüsünü gerçekten bu şekilde tespit etmek mümkün olabilir. O zaman deneye bir Pockels hücresi koyup girişime engel olmak ufak bir adım olacaktır.

Bunun önemini daha iyi anlamak için şöyle bir örnek vereyim: Teleskoplarımıza bağlı detektörlere gelen fotonlar bizden 10^{22} km uzaktaki bir kuasardan bir milyar yıl önce yola koyulmuş olabilir. Dünyaya gelen iki güzergâh arasında bir "seçim" yaparlar. Bir yoldan ya da ötekinden gidebilirler ya da gizemli bir şekilde ikiye ayrılıp iki yoldan birden gidebilirler. Fakat yolculuğa bir milyar yıl önce ve 10^{22} km uzakta başlamışken, hangi yolu takip edecekleri görünüşe göre dünyadaki bir astronomun, mesela 1990'larda ya da 2000'lerin başında, fotonları gözlemleyen teleskoba bağlı bir Pockels hücresini açıp açmama kararına bağlıdır.

Neler olup bittiği konusunda buradaki yanlış anlama, Wheeler'a göre:

bir fotonun astronom gözlemlemeden önce fiziksel bir biçime sahip olduğu varsayımıdır. Ya bir dalgaydı ya da parçacık, ya galaksinin iki yanından geçti ya da tek bir yanından, diye düşünülür. Aslında kuantum fenomenleri ne dalgadır ne de parçacık, ölçülecekleri âna kadar bünyeleri gereği tanımsızdırlar. Bir anlamda Piskopos Berkeley iki yüzyıl önce "var olmak algılanmaktır"[51] diye iddia ederken haklıydı.

Bunun bize bir faydası olacağından pek emin değilim. Bunu nasıl tarif etmeye çalışırsanız çalışın, gecikmiş seçim deneyinin kozmik versiyonunda belli ki *çok* tuhaf şeyler olur. Bütün evren sanki bir insan bireyinin, sözgelimi bundan birkaç yıl sonra Şili'de bir dağ tepesinde ne deneyi yapacağını önceden "biliyor" gibidir. Wheeler gerçekten de koskoca evrenin birileri onu seyrettiği için var olduğunu söyleyecek kadar ileri gitmiştir – ona göre her şey, 15 milyar yıl kadar önceki Büyük Patlama'ya kadar her şey, fark edilinceye kadar belirsiz kalmıştır. Bu, ne tür bir yaratığın, gerek kendisinin gerekse evrenin geri kalan kısmının var olduğunu fark edecek ve kozmik dalga fonksiyonunu çökertecek kadar uyanık olma vasfına sahip olduğuna ilişkin o müthiş soruları (kutudaki kedi düşünce deneyindekiler gibi) gündeme getirir. Bunlar bir sonraki bölümde ele almak istediğim meseleler; ama önce dalga fonksiyonunu çökertme işine oldukça başka açıdan bakan bir düşünce deneyi. Buna göre bir gözlemin *olmayışı* bir sistemin dalga fonksiyonunu çökertebilir.

Kuantum dünyasının tuhaflığına dair bu harika örnek ta 1950' lerin başlarına kadar gider. Deney, onu ilk düşünen Alman fizikçi Mauritius Renninger'e istinaden "Renninger'in olumsuz sonuç deneyi" diye anılır. Kuantum tuhaflığını anlamaya yarayan –ama açıklamaya pek yaramayan– en kolay örneklerden biridir.

Bu düşünce deneyinin benim hafif değiştirdiğim versiyonunda rasgele bir yöne tek bir kuantum parçacığı yayan bir kaynak düşünelim (sıradan radyoaktif çekirdekler tam da bunu yapar, dolayısıyla kaynak sorun değil). Bu kaynak, içi boş büyük bir küre içinde olsun. Kürenin iç yüzeyi de parçacık çarptığında bir an parlayacak bir malzemeyle kaplı. Kaynak bir parçacık yaydığında ne olacağına

51. *Scientific American*, Temmuz, 1992, s. 75.

dair kabul edilmiş kuantum tarifine göre, parçacığın herhangi bir yöne yayılma olasılığı eşit olduğundan kuantum olasılık dalgası her yöne eşit şekilde dağılır. Olasılık dalgası kürenin iç yüzeyine eriştiğinde dalga çökerek tek bir parçacığa dönüşeceğinden tek bir ışık parlaması olur. Parçacık sadece gözlemlendiğinde –ışık parlayınca– "gerçek"tir, ışık kaynağından küreye yolculuk ederken değil.

Buraya kadarı basit. Fakat şimdi kaynakla kürenin orta yerinde yarım küre biçiminde bir kalkan olsun. Bu kalkan dış kürenin tam olarak yarısını kaynağın görüş alanından çıkarır. Dış yüzey gibi bu iç yarım küre de kaynaktan bir parçacık çarptığında kıvılcım çıkaracak bir maddeyle kaplı. Şimdi kaynak bir parçacık yaydığında ne olur?

Sadece iki nihai durumu olan bu deneyin olası sonuçlarının basit bir kuantum tarifini kurmak mümkün. Parçacığın dış ya da iç kürede tam olarak nerede kıvılcım yarattığıyla ilgilenmiyoruz, sadece iki küreden hangisine çarptığıyla ilgileniyoruz. Parçacık ya iç küreye çarpıp onu parlatır ya da dış küreye çarpıp onu parlatır. Durumu anlattığım şekliyle iki sonucun da eşit olasılığı var. Şimdi kaynak bir parçacık yayması için bir kere daha tetiklensin. Bir kere daha standart kuantum kuramı bunu her yöne eşit olarak hareket eden, genişleyen küresel olasılık kabuğu olarak tanımlar. İç küreye ulaşması için gereken zamandan daha uzun, ama dış küreye ulaşması için gerekenden daha kısa bir süre bekleriz ve iç kürede kıvılcım görmeyiz. Dolayısıyla deneyin son durumunda dış kürede bir kıvılcım çakacağını *biliriz* – ilk küreye vurması için parçacığın yanlış yöne yayılmış olması gerekir. Başlangıçta kıvılcımın yüzde 50 iç yarım kürede yüzde 50 dış kürede meydana gelmesi olasılığı varken kuantum dalga fonksiyonu kıvılcımın dış kürede çakmasının yüzde 100 olduğu bir kesinliğe çöker. Fakat bu, gözlemci gerçekten hiçbir şey "gözlemlemeden" meydana gelir! Bunun sebebi gözlemcinin deneyde neler olup bittiğine dair sahip olduğu *bilgideki* bir değişikliktir. Bunun için, neler olduğunu ve parçacığın iç küreye doğru yol almış olması halinde ne olacağını çıkarsayacak akıllı bir gözlemci gerekir (mesela bir kedi böylesi bir dalga fonksiyonu çöküşüne sebep olacak kadar akıllı olamaz). Bu şartlar altında, bir gözlem *eksikliği* dalga fonksiyonunun çöküşünde fiili bir gözlem kadar etkili olabilir. En azından Kopenhag Yorumu böyle söylüyor.

Gözlemcinin –herhangi bir gözlemci değil, akıllı bir gözlemcinin– bu önemli rolü kuantum mekaniğinin standart Kopenhag Yorumu'nun can damarını oluşturur. Fakat bunu doğrulamak çok zordur; en fazla, son çare olarak pragmatik bir yaklaşımla kuantum mekaniği "yemek kitabı" için kullanılan bir formüle dönüştürülebilir. Kuantum pastası pişerken neler olup bittiğini anlamaksızın belli amaçlara ulaşmak için bazı tarifleri uygularsınız.

Pek çok fizikçi kuantum aşçılığını fazla dert etmeden yarım yüzyılı aşkın süredir tarifleri kullanmaktan memnun olsa da, kuantum dünyasının tuhaflığını yorumlamanın daima alternatif yolları olmuştur. Ne yazık ki, tartışmalar çok canlı olmasına rağmen mevcut alternatif yorumların hepsi, daha yakın zamana kadar, Kopenhag Yorumu'ndan daha az kusurlu olmamıştır. Yine de kabul edilebilir bir kuantum yorumunun ne kadar açıklayıcı olabileceğini görmek ve kitabın sonunda müthiş bir kuramı gözler önüne serdiğimde yeterince etkilenmenizi sağlamak için çaresizlikten doğan bu açıklamalara kısaca bakmakta yarar var.

Dördüncü Bölüm

Son Çareler

Kuantum kuramının en göze çarpan özelliklerinden biri kuramın "gerçekten ne demek istediği"nin pek çok farklı yorumunun olması. Bunların çoğu felsefi temelleri açısından birbirine tezat şeyler, fakat hepsi bilinen deneyleri doğru olarak açıklayıp yeni deneylerin sonuçlarını doğru tahmin ediyor. *Hepsi* Newton'un "iyi kuram testini" geçiyor! Bilimin başka hiçbir alanında böyle bir şey yok – mesela, 20. yüzyıl fiziğinin diğer büyük kuramı olan Einstein'ın genel görelilik kuramının beş-on tane "yorumu" yok.

Kuantum kuramındaki yorum seçenekleri, aslında, iki (ya da daha fazla) delik deneyinden geçen bir fotonun seçeneklerini hatırlatır. Görünüşe göre foton deney düzeneğinde iki yoldan birden geçebilme yeteneğine sahiptir, oysa gündelik hayatta iki yoldan aynı anda gidilemez. Kuantum kuramı birbiriyle bağdaşmayan pek çok yoruma açık gibidir, fakat iki delik deney düzeneğinde iki yoldan birden giden foton gibi, hepsi de –bir anlamda– doğrudur. Hangi yorumun "doğru yorum" olduğunu söylemeye çalışmaktan ziyade, bazı fizikçiler –*The Cosmic Code*'un (Kozmik Kod) yazarı Heinz Pagels başta olmak üzere– hepsini bir tür ihtimallerin üst-üste-binme durumunda görerek her bir yorumdan kuantum dünyası hakkında biraz bir şeyler öğrenmemiz gerektiğini ileri sürmüşlerdir. Ne var ki, uzmanlardan çok azı bu görüşü kabullenebilecek kadar geniş görüşlüdür. Genellikle fizikçiler (tabii bu meseleleri düşünmeye zahmet edenler) kendi tuttukları yorumun doğru olduğu ve öteki bütün yorumların "bariz şekilde" yanlış olduğu fikrine sıkı sıkıya bağlı kalmaya eğilimlidirler.

Bu tartışmanın doğası (gerçi böylesi bilimsel çamur atmalar için "tartışma" sözcüğü biraz yumuşak kaçabilir) 1980'lerin ortala-

rında Paul Davies (o zamanlar Newcastle Üniversitesi'nde fizik profesörü) ve Julian Brown (BBC radyo yapımcısı) yeteneklerini birleştirip kuantum kuramı hakkında bir BBC radyo programı yapınca çok hoş bir şekilde gün yüzüne çıktı. Davies ve Brown zamanın en iyi sekiz kuantum fizikçisiyle söyleşi yapıp onlardan kuantum gizemleri hakkındaki görüşlerini alarak bunların nasıl açıklanabileceğini sordu. Yayın bittikten sonra, söyleşinin bazı tanıtım kısımlarıyla birlikte bütün dökümü *The Ghost in the Atom* (Atomdaki Hayalet) adıyla kitaplaştırıldı. Orada uzmanların her birinin tek bir yorumun doğru olup diğerlerinin imkânsız olduğunu ciddi ciddi iddia ettiklerini görürsünüz. Tek sorun uzmanların *hangi* yorumun doğru olduğu konusunda uyuşmadıklarıdır. Birkaç istisna dışında hepsi, kendilerinden son derece emin bir halde gerçekliğin farklı versiyonlarında karar kılıp diğerlerini hesaba almıyor. Kitap sadece farklı yorumlar arasındaki ayrılığı değil yorumcular arasındaki ayrılığı da bugüne kadar gördüklerimden çok daha açık ve kolay anlaşılır biçimde ortaya koyuyor. Ben de bu bölümde bu farklılıkları vurgulamak için zaman zaman o kitaptan alıntılar yapacağım.

Gerçi her kuantum gerçekliği yorumunun çok ayrıntılı bir dökümünü vermek niyetinde değilim, fakat belli başlı dört-beş rakibin bir özetini sunacağım. Benim kendi görüşüm, bunların hiçbirinin dünyanın nasıl işlediğine dair tatminkâr bir açıklama sunmadığıdır. Yine de, Pagels gibi, hepsinin kavrayışımıza yararlı olduğu kanaatindeyim. Bir sonraki bölümde daha ayrıntılı ele alacağım gibi, dünyanın kuramsal "model"inin işe yaraması için kusursuz olması gerekmiyor. Kopenhag Yorumu bunun en güzel örneğidir. Kusurlu olduğu bariz olan bu model yarım yüzyılı aşkın süredir kuantum mekaniğine uygulama temeli sağlamıştır.

Kopenhag Çöküşü

Kopenhag Yorumu'nun kuantum gerçekliğinin "resmi" açıklaması olarak görülmesinin nedeni kısmen tarihsel tesadüf, kısmen de bu yüzyılın en büyük matematikçilerinden birinin yaptığı gülünç bir hatadır. Tarihsel tesadüf olması işe yarayan ilk yorum olmasından gelir. Bu felsefenin daha derin gizemleriyle kendilerini yormak istemeyen kuantum aşçılarına, kuantum pastalarını pişirmek için kul-

lanacakları tarifler sunma anlamında işe yaramıştır (aynı zamanda güçlü bir kişilik –nadiren bir tartışma kaybetmiş olan Niels Bohr– tarafından ileri sürülmüş olmasının da bunda payı vardır). Kopenhag Yorumu bu pratik çerçevede işe yaradığından, çok az sayıda kuantum mekanikçisi daha derin içerimlerini dert etmiştir.

1980'lerin ortalarında bile bu resmi konum hâlâ revaçtaydı, hem de sadece kuantum aşçılarının daha az felsefi olanlarının arasında değil. 1907'de Berlin'de doğmuş, İngiltere'ye yerleşmeden önce pek çok kuantum mekaniği öncüsüyle çalışmış olan fizikçi Sir Rudolf Peierls *The Ghost in the Atom*'daki yazısında buna açıklık getirmiştir. "Kopenhag Yorumu terimine karşıyım, çünkü kuantum mekaniğinin sanki birkaç yorumu varmış gibi oluyor. Sadece bir yorum var. Kuantum mekaniğini anlayabileceğiniz tek bir yol var."[52] Bunları söyleyen Niels Bohr, Heisenberg ve Max Born'un geleneğinde yetişmiş eski ekolden bir fizikçi.

Şimdiye kadar Kopenhag Yorumu'nun ne olduğu hakkında iyi bir fikir edinmişsinizdir –tamamlayıcılık, olasılık dalgaları ve dalga fonksiyonunun çöküşünün bir bileşkesi– o yüzden tekrar uzun uzadıya anlatmam gerekmiyor. Fakat üç sac ayağından biri olan Bohr tamamlayıcılık anlayışına, aynı deneyde tek bir fotonun hem dalga hem de parçacık olarak davrandığını gösteren deneylerden dolayı artık kuşkuyla bakılıyor. Ayrıca Kopenhag ekolu için, elektron ya da foton gibi bir kuantum varlığının ölçüm yapılmadığı sürece konum ya da momentum gibi özellikleri *yoktur*. Sadece bu değerlerin ne olduğunu bilmiyor değiliz; kurama göre gözlemlenmedikçe bu özellikler mevcut değildir.

Bu, Kopenhag Yorumu'ndaki büyük sorunu mercek altına yatırmıştır. Dalga fonksiyonunun çöküşü *ne zaman* (ya da *nerede*) gerçekleşir? Geiger cihazı bir atomdan gelen radyoaktif parçacık yayılımını tespit edip Schrödinger'in kutudaki kedi deneyindeki bütün sistemin dalga fonksiyonunu çökertebilir mi? Görünüşe bakılırsa çökertemez, özellikle de, dalga fonksiyonun çöküşüne bir ölçümün *yokluğu*nun sebep olduğu Renninger tarzı bir düşünce deneyinin ışığı altında. O halde bilinç, hatta akıl dalga fonksiyonunun çöküşünde esas bileşen midir?

52. Davies ve Brown, *The Ghost in the Atom*, s. 71.

Felsefi eğilimleri olan fizikçiler Kopenhag Yorumu'nun ilk ileri sürülmesinden bu yana gündelik hayatla kuantum dünyası arasındaki ara yüzü tam olarak nereye koymaları gerektiğini tartışıp duruyorlar. Katı Kopenhag Yorumcuları bizim elektronun fiziksel nitelikleri olarak gördüğümüz şeyin elektronlarla ölçüm cihazları arasındaki ilişkilerden başka bir şey olmadığını ve bu özelliklerin elektronlara değil, bütün sisteme "ait" olduğunu savunuyorlar. Amerikalı fizikçi David Mermin 1993 yılının ağustos ayında Keele Üniversitesi'nde Britanya Bilim Geliştirme Derneği'ne hitap ettiği konuşmasında, neler olup bittiğine dair özellikle uygun bir analoji attı ortaya.

Psikologlar ve biyologlar aklın doğasına ilişkin olarak ne kadarının kalıtımla geçtiği ne kadarın çevre etkisi ve eğitimin bir sonucu olduğu konusunda kıyasıya tartışırlar. "IQ testi" denilen, insanın "zekâ derecesi"ni ölçen testler geliştirmişlerdir. Fakat, uzun yıllar önce pek çok insan IQ testlerinin zekâ ölçüsünü gösterdiğine inansa da, şimdi genel kabul gören anlayışa göre IQ testlerinin ölçtüğü şey insanların IQ testi çözme yeteneğidir. Doğuştan gelen zekâ bu yeteneği belirlemede bir etken olabilir, fakat tek etken değildir. "Deneyin" (yani birine IQ testi vermenin) sonucu, deneyin kendisinin doğasına bağlıdır (basit bir örnek vermek gerekirse, test Rusça hazırlanmışsa ve Rusça bilmiyorsanız testten yüksek puan almanız mümkün değildir).

Keza, mesela bir elektronun momentumunu ölçmeye koyulmuşsanız, yaptığınız şey aslında elektronun, momentumu hakkındaki sorulara cevap verme yeteneğini ölçmekten ibarettir. Elektronun gündelik hayatta düşündüğümüz türden böyle momentum diye bir özelliği olmayabilir de, fakat momentum hakkındaki sorulara belli bir şekilde cevap vermesine sebep olan başka nitelikleri vardır. Deneysel sonuçları –"cevapları"– alırız ve bunları momentum ölçümü olarak değerlendiririz. Oysa bunlar bize sadece elektronların momentum testlerine cevap verme yetenekleri hakkında bilgi verir, yoksa gerçek momentumları hakkında değil, tıpkı IQ ölçüm sonuçlarının insanların gerçek zekâları hakkında değil, IQ testlerine cevap verme yetenekleri hakkında bilgi vermesi gibi.

Amerikalı fizikçi Nick Herbert başka bir analoji önermiştir. Bohr kendi başına maddi parçacıkların var olmadığını, bunların an-

cak başka sistemlerle etkileşimleri sonucu –mesela bir elektronun "momentum"unu "ölçtüğümüzde"– tanımlayabileceğimiz soyutlamalar olduğunu söylemişti. Herbert bunu gökkuşağına benzetir.[53] Gökkuşağı maddi bir nesne olarak mevcut değildir ve her gözlemciye farklı bir yerde görünür. İki insan aynı gökkuşağını görmez (hatta iki gözünüzden her biri hafiften farklı bir gökkuşağı "görür"). Ama "gerçek"tir – resmi çekilebilir. Fakat *gözlemlenmediği* ya da *resmi çekilmediği takdirde* aynı şekilde gerçek de değildir. Benzer biçimde Bohr'a göre elektron gibi bir kuantum varlığının özellikleri, kuantum varlığının deney düzeneğiyle etkileşiminin meydana getirdiği bir tür yanılsamadır.

Kopenhag Yorumu'nun bu temel versiyonunda "olgu" bir ölçümün sonucunun kaydıdır – Geiger cihazının ötmesi ya da bir elektronun bir detektör perdesine ulaştığını gösteren bir ışık kıvılcımının görülmesidir. Fakat ölçüm cihazlarının kendileri de elektron, atom ve başka kuantum varlıklarından oluştuklarına göre başka kuantum varlıklarından farklı tarif edilmekten nasıl kurtulabilirler? Geiger cihazının kendisi ilke olarak bir kuantum olasılık dalgası şeklinde tarif edilir; bir üst-üste-binme durumunda ("öter" ya da "ötmez") vardır. Detektörün kendisinin ikinci bir detektör tarafından izlenerek "gerçek kılındığını" düşünebiliriz, ama o zaman ikinci detektör de (Schrödinger'in kedisi gibi) üçüncü bir monitör tarafından izlenene kadar üst-üste-binme durumunda var olur ve bu böyle sonsuza kadar devam eder. Bazı yorumcuların dalga fonksiyonlarının çökmesine neden olan o özel şeyin akıllı gözlemcilerin beyninin içinde olup bittiğini ileri sürmesi bu yüzdendir.

Düşünüyorum, O Halde

Bu hâlâ Kopenhag Yorumu'dur, ya da en azından onun uzun süre ayakta kalan bir versiyonu. Daha önce gördüğümüz gibi koyu bir Kopenhagcı olan Peierls'e göre, "bir ihtimali atıp sadece ötekini tuttuğunuz an, deneyin bir sonuç verdiğinin nihayet *bilincinde* olduğunuz zamandır".[54]

53. Herbert, *Quantum Reality*, s. 162.
54. Davies ve Brown, *The Ghost in the Atom*, s. 73.

John Wheeler'ı evrenin sadece ona baktığımız için var olduğu çıkarsamasına götüren akıl yürütme tarzı budur. Kuantum mekaniği açıklamaları bu yorumda *bilgi* bakımından görülür ve zihnin varlığı kesinlikle hayati öneme sahiptir. Kuantum dünyasıyla gündelik hayat arasındaki farkın büyüklükle ilgili olduğunu ileri sürmekle bu oldukça farklıdır ama o fikir de Kopenhag Yorumu şemsiyesi altından gelir. O fikirdeki sorun, yine, çizgiyi nereden çizeceğinizdir. Oxford Üniversitesi'nden Roger Penrose *Kralın Yeni Usu* adlı kitabında bunun kütle çekimiyle bir ilgisi olduğunu (bence ikna edemeden) ileri sürer. Kütle çekimi çok zayıf bir kuvvettir ve elektron gibi varlıklarda tamamen göz ardı edilebilir. Belki, bu doğrultuda düşünürseniz, kütle çekiminin dikkat edileceği kadar madde mevcutsa bir nesnenin "kuantumluğu" bozulur ve gündelik hayatta karşılaştığımız "klasik" nesneye dönüşür. Penrose kara deliklerde bilginin kaybolma şekliyle ve evrenin başka yerlerindeki kuantum faaliyetleriyle bunun nasıl telafi edileceğine ilişkin çok daha incelikli argümanlar üretir; fakat bütün olarak ikna edici olmaktan son derece uzaktır. Biraz daha akla yatkın olarak David Bohm kuantum dünyasının kenarlarını bulanıklaştıran şeyin ısı olabileceğini ileri sürmüştür. Bu şekilde düşünürseniz, her atom ve her elektron sürekli rasgele ısıl devinimle sağa sola sallanır ve belki de belli bir büyüklüğe ulaşıp da birbiriyle çarpışıp duracak yeterli parçacık içerince varlıkların kuantumluğunu yok eden şey budur.

Fakat bütün bunların "zihinde" olduğunu düşünen kuantum yorumcuları bunların hiçbirini kabul etmeyecektir. Kütle çekimiyle bir arada tutulan ve sıcaklığına uygun olarak rasgele ısıl hareketle birbirlerine çarpan atomlarla dolu ay kadar büyük bir nesnenin bile, kimse bakmazken var olmadığını söyleyeceklerdir. Cornell Üniversitesi'nden David Mermin bu doğrultuda fikir ileri sürmüş fizikçilerden biridir. Onlara göre, ay kimse bakmazken ortadan kayboluvermez; daha ziyade, Üçüncü Bölüm'de anlatılan kuantum kazanındaki berilyum iyonları gibi aya kimse bakmazsa, bütün atomları, elektronları ve diğer kuantum öğeleri, kuantum durumları hakkında belirsiz olmaya başlar. Son gözlemlendikleri durumdan olasılık dalgaları çok yavaş olarak etrafa yayılır; bütün ay bir kuantum hayaletine bürünür. Fakat ay çok büyük olduğu için bu süreç çok yavaştır. Ayın kuantum belirsizliği içinde eriyip gitmesi birkaç na-

nosaniye değil, milyonlarca (belki de milyarlarca) yıl sürer. Fakat bu meydana gelmeden çok önce birisi ona bakar ve dünyanın çevresindeki belirli bir yörüngeye tam olarak yerleştirilmiş kütle merkeziyle onu belirli bir duruma çökertir. Ayın (ve başka her şeyin) gerçek bir nesne olarak görünen varlığı bu yorumda kuantum kazanını seyretme etkisi olarak açıklanır.

Pırıltılı sayaç (*scintillator*) ekranına elektronların fırlatılması, ekranın resminin çekilmesi ve bir kişinin deneyin sonucunu bulmak için bu fotoğrafa bakması olayından söz eden John Bell, bu durumu az ve öz olarak şöyle özetlemiştir:

> [Kuantum dünyasıyla gündelik hayattaki ayrımın bir büyüklük meselesi olduğu fikrine] romantik bir alternatif var. Bu alternatif "kuantum" ile "klasik" arasında (...) keskin ya da yumuşak geçişli bir ayrım olduğunu kabul eder, fakat bu ayrımı küçükle büyük arasında bir yere koymak yerine, "madde" ile "zihin" arasına koyar. Elektron tabancasının kuantum kuramsal açıklamasını mümkün olduğunca tamamlamaya çalışırken, önce pırıltılı sayaç ekranını ele alırız, sonra fotoğraf filmini, sonra tabetmede kullanılan kimyasal maddeleri, gözlemcinin gözünü (...) ve de (neden olmasın) beynini. Beyin atomlardan, elektron ve çekirdeklerden yapıldığına göre dalga mekaniğini uygulamak için neden tereddüt edelim ki (...) en azından böylesi karmaşık bir atom topluluğu için gerekli hesapları yapacak kadar kafamız çalışıyorsa. Fakat beynin ötesindeki şey (...) zihindir. Zihin de maddi bir şey olmasa gerek. Demek ki nihayet burada cam ekrandan ve jelatin filmden belirgin biçimde farklı olan bir şeyle karşı karşıyayız.[55]

Bu fikirleri geliştirmeye çalışan kuantum yorumcuları beynin kendisinin bir bakıma özel bir tür kuantum sistemi olduğunu, dalga fonksiyonlarını çökertmeye özellikle uygun olan bütünsel (doğrusal olmayan) bir işleyişinin olduğunu ileri sürüyorlar bazen. Berkeley Kaliforniya Üniversitesi'nden Henry Stapp'in belirttiği gibi, düşünme ve bilinçte kuantum süreçleri elbette yer alır. Beyindekiler de dahil olmak üzere insan sinirleri elektrik darbeleri yayarak faaliyet gösterir ve aynı zamanda sinapslara da (bunları sinirler arasındaki bağlantılar olarak düşünebilirsiniz) kimyasal olarak darbe yayar. Bir sinire gelen atım, kalsiyum iyonlarının açığa çıkmasını

55. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, s. 191. Burada Bell'in kendi kuantum gerçekliği görüşünü sunmadığını, Eugene Wigner ve John Wheeler gibi insanların savlarını özetlediğini vurgulamam gerek.

tetikleyecektir. Bu iyonlar geçidi geçip bir sonraki faaliyet atımını tetikler. Böyle bir süreçte yer alan tipik bir kalsiyum iyonu saniyenin 200 milyonda biri gibi bir sürede yaklaşık metrenin 50 milyarda biri kadar yol kat eder. Stapp'e göre: "Belirsizlik ilkesinin basit tahminleri kalsiyum iyonunun dalga paketinin, kalsiyum iyonunun kendisinden çok daha büyük hale geleceğini gösteriyor. Dolayısıyla tek bir klasik yörünge fikrinin uygun olmadığı görülüyor. Kuantum kavramları ilke olarak kullanılmalı."[56]

Bu doğru, hatta bariz de; fakat Bell'in beynin atomlardan meydana geldiği ve bu yüzden dalga mekaniği kurallarına uyması gerektiği yorumundan nitelik olarak farklı değil. Mesela bu, bazılarının savunmaya çalıştığının aksine, insan beyninin bu kuantum özelliklerinden dolayı hiçbir yapay bilgisayar beyninin bilinçli olamayacağı anlamına gelmez. Ne de olsa elektronik bilgisayarlar da atomlardan yapılmıştır ve kuantum mekanik yasalarına uyarlar; örneğin sinapslarda kuantum belirsizliği bölgelerine yayılan kalsiyum iyonlarının belli özelliklerinin bilincin zorunlu bir öğesi olduğu ortaya çıksaydı, o zaman bu tür bir davranışı içerecek yapay bilgisayar beyinleri kurmak (ilke olarak) gayet basit olurdu.

Fakat bu kadarı yeter. Bu mistik yollarda bazı insanlar daha da ileri gittiyse de buna gerek yok. Size Kopenhag Yorumu'nun eğer bırakırsanız sizi nerelere götürdüğünü gösterdim ve bunun kuantum gerçekliğinin tamamen tatmin edici bir açıklaması olmadığına sizi ikna ettim (diye umuyorum). Bu yorumun başarısı önce de söylediğim gibi büyük ölçüde tarihsel bir tesadüfle tam olarak çözülmüş ilk yorum olmasına ve güçlü bir kişilik tarafından desteklenmesine dayanır. Nobel Ödüllü fizikçi Murray Gell-Mann 1976'da şu yorumu yapmıştı: "Niels Bohr koskoca bir kuşağın beynini yıkayarak onları sorunun çözümlenmiş olduğuna inandırdı";[57] fakat Bohr'un beyin yıkamadaki başarısının bir sebebi o sıradaki tek rakip yorumun matematikçi John von Neumann'ın yaptığı bir hesaplamayla baltalanmış olmasıdır. Oysa von Neumann yanılmıştı.

56. Stapp, *Mind, Matter, and Quantum Mechanics*, s. 152.
57. Gell-Mann, *The Nature of the Physical Universe*, New York: Wiley, s. 29.

Von Neumann'ın Gülünç Hatası

Von Neumann'ın hatası özellikle talihsizdi, çünkü ortadan kaldırdığı kuantum mekaniği yorumu bizim naif gerçeklik görüşümüze Kopenhag Yorumu'nun benzediğinden daha çok benziyordu. Fizikçiler (pek çok bilim insanı gibi) önemli ölçüde muhafazakârdırlar ve ellerinden geldiği sürece eski fikirlere sıkı sıkıya tutunurlar, ta ki çürütülemez deneysel kanıtlar bu fikirlerin terk edilmesini zorunlu kılana kadar. Bu davranış tarzını da göz önüne alınca, "gizli değişkenler" kuramları olarak bilinen şeyin alternatif "pilot dalga" versiyonunun Kopenhag Yorumu'yla dürüst bir dövüşü tek eliyle kazanması çok muhtemel görünüyor. Bir kuşak fizikçi gizli değişkenler kuramlarının kuantum gerçekliğini açıklamanın standart yolu olduğunu düşünerek yetiştirilmiş olacaktı ve Kopenhag Yorumu Niels Bohr'un bunadıktan sonra değilse bile kesinlikle en iyi eserini çok geride bıraktıktan sonra ileri sürdüğü tuhaf bir alternatif olarak hatırlanacaktı.

Gizli değişkenler kuramlarının kilit noktası elektron gibi bir varlığın gündelik hayattaki anlamıyla gerçek bir parçacık olarak var olabilmesidir. Her zaman gerçek bir momentum ve gerçek bir konumla; fakat özelliklerini sınırsız bir hassasiyetle ölçemeyiz. Kuantum dünyasındaki parçacıkların davranışı bu tabloda, genellikle yeni bir alan olarak tarif edilen bir tür ekstra fenomenle belirlenir. Bu fenomen doğrudan gözlemlenemeyecek biçimde değişkendir. Yeni alanın gizli değişimleri parçacıkların kuantum seviyesindeki davranışlarını belirler. Fizikçiler bu gizli değişkenlerin ne olduğunu bilselerdi bunları sadece farklı sonuçların olasılıklarını değil ölçümlerinin gerçek sonuçlarını tahmin etmek için kullanabilirlerdi. Mesela Schrödinger'in kedisinin ölü mü diri mi olduğunu kutuyu açmadan hesaplayabilirlerdi.

Standart gizli değişken kuramı orijinal haliyle ilk defa 1925'te Louis de Broglie tarafından ileri sürülmüştür. De Broglie 1892'de doğmuş (ve 1987'ye kadar yaşamış), fakat kısmen Birinci Dünya Savaşı'nın eğitimini sekteye uğratması nedeniyle bilim kariyerine geç başlamıştır. Elektronların dalga cinsinden ifade edilebileceğini ilk fark eden o olmuştu ve 1920'lerin ortalarında bu keşfi elektron-

ların aynı zamanda parçacık olarak tarif edilebileceği olgusuyla bağdaştırmaya çalışıyordu. Kuantum yorumcuları için faydalı bir yol bulmaya epey yaklaşmıştı. Ama ne yazık ki, Fransız aristokrasinin bir üyesi olmasına rağmen (1960'ta ağabeyinin ölümünün ardından hem Fransız unvanı *Duc*'ü, hem de Alman unvanı *Prinz*'i almıştı) Broglie Bohr kadar güçlü bir karakter değildi ve 1930'larda fikri sorgulandığında çok mücadele etmedi. Bu fikrin esasına göre, mesela elektron "gerçek" bir parçacıktır (gündelik hayattaki anlamıyla), fakat davranışı kuantum olasılığının kurallarına uyan ve onu sağa sola iten "pilot dalga" tarafından belirlenir.

Kopenhag Okulu'nun hiç benimsemediği bu fikir, von Neumann 1932'de kuantum kuramı üzerine yeni ufuklar açan bir kitap yayımlayınca görünüşe göre baş edilmez güçlüklerle karşılaşmıştır. Bu kitap, başka şeylerin yanı sıra, hiçbir gizli değişken kuramının kuantum dünyasındaki varlıkların davranışını doğru düzgün tarif edemeyeceğine dair matematiksel bir kanıt gibi görünen bir şey de içeriyordu.

Fizikçiler meselenin bu dış görünüşüne kandılar, çünkü von Neumann zamanının en iyi matematikçilerinden biriydi. 1903'te Budapeşte'de doğmuştu (asıl adı Johann'dı fakat hayatının sonraki dönemlerinde "John" adını kullandı). 1928'de matematiğin oyun kuramı denilen dalını keşfetti. Bu, bir oyunu oynamak için gereken en iyi stratejiyi belirlemek için –en çok nasıl kazanılır, ya da en azından, nasıl kaybedilmez– matematik modeller (denklemler grubu) kurmaktan oluşuyordu. Savaş "oyunları"na ve iktisadi modellere uygulanmasından dolayı matematiğin ana dallarından biri olmuştur. "Dalga fonksiyonunu çökertip" üst-üste-binme durumundan tek bir kuantum alternatifi seçmek için bilinçli bir gözlemcinin gerekli olabileceğini ilk ileri süren de oydu.

Von Neumann 1930'da ABD'ye taşınmış ve 1933'te (kısmen Albert Einstein'a bir üs sağlamak için) henüz kurulmuş olan Princeton'daki İleri Araştırmalar Enstitüsü'nün en genç üyesi oldu. Elektronik bilgisayarların (bazı çevrelerde bilgisayarlara hâlâ "von Neumann makineleri" denir), atom ve hidrojen bombalarının geliştirilmesinde öncülük etmiştir. 1957'de genç yaşta ölmesine rağmen 20. yüzyıl bilimini önemli ölçüde etkilemiştir. Von Neumann aslında cin gibiydi; ama dâhiler bile bazen hata yapar.

Hata, bildiğimiz toplama hatasıydı. Matematikte bir denklemde işlem sırası önemli değilse böyle denklemlere değişme özelliği olan denklemler denir. Örneğin, 3 + 2 ile 2 + 3 aynıdır. Toplama işleminin değişme özelliği vardır. Fakat eğer işlem sırası önemliyse o zaman işlemin değişme özelliği yoktur. Mesela 3 – 2 ile 2 – 3 aynı *değildir*. Çıkarma işleminin değişme özelliği yoktur. Kuantum dünyasında toplama işlemi bile her zaman değişme özelliğine sahip değildir. Genel olarak şeylerin meydana geliş sırası bir dizi etkileşimin nihai sonucunu etkiler. Bu biraz yemek pişirmeye benzer – bir pasta yaparken "bir bardak su ilave edip 30 dakika fırında pişirin" ile "30 dakika fırında pişirip bir bardak su ilave edin" arasında bariz farklı sonuçlar elde edersiniz.

Ayrıntıya girmeyeceğim, fakat von Neumann gizli değişkenler kuramlarının işe yaramayacağını gösteren "kanıt"ında, bir kuantum sistemindeki belli bir özelliğin *ortalama olarak* değişme özelliği kurallarına uyacağı bilgisini kullanıp bu kuralı kuantum sisteminin bireysel öğelerine uygulamıştır. Bu biraz, bir sınıftaki bütün çocukların boy ortalaması 1.2 metreyse, sınıftaki her bir çocuğun boyu 1.2 metredir, demeye benzer. Elbette ortalama almanın bir yoludur bu, ama tek yolu değildir (en uygun yolu ise hiç değil). Her çocuğun ortalama boya sahip olduğunu varsaymak gülünç olurdu.

Von Neumann'ın argümanındaki hatayı ortaya çıkarmak ortalama almaktan daha fazlasını, biraz daha fazla matematik kavrayışını gerektirir, fakat yine de yetkin bir matematikçiye bariz görünecektir. Böyle bir matematikçi olan Grete Hermann 1935'te bu hataya işaret etti fakat dikkate alınmadı. 1966'da John Bell keşfettiği şey karşısındaki şaşkınlığını ifade edene kadar Hermann dışındaki herkes von Neumann'ın kanıtına inanmaya devam etti:

> Von Neumann'ın kanıtı, şayet gerçekten kavrarsanız, elinizde dağılır! İçinde *hiçbir şey* yoktur. Sadece hatalı değil, *gülünçtür* de! ... [Varsayımlarını] fizik kurallarına tercüme ederseniz, saçmalıktan ibarettir. Bu konuda benim ağzımdan şöyle yazabilirsiniz: Von Neumann'ın kanıtı sadece yanlış değil *aptalcadır*![58]

David Mermin 1993'te yazdığı bir yazıda, gizli değişken kuramlarını kurmaya teşebbüs etmiş ama von Neumann'ın bunun yapıla-

58. *Omni*'deki söyleşi, Mayıs 1988, s. 88.

mayacağını kanıtladığı iddiasıyla "boyun eğmeye mahkûm edilmiş" ihtisas öğrencileri kuşağından söz eder. Ona göre Von Neumann'ın "gizli-değişken-yoktur kanıtı" öyle gülünç bir varsayıma dayanır ki, insan "bu kanıtın öğrenciler tarafından" ya da kuantum yorumları diyarının "spekülatif maceralarından kurtulmak için ona başvuranlar tarafından hiç incelenip incelenmediğini sormadan edemez."[59]

Meselenin üstünde biraz fazla durmamın iki sebebi var. Birincisi, fizikçiler de başka herkes gibi, bir fikri "herkes biliyor" diye doğru kabul edecek kadar saf olabiliyorlar ve ünlü bir kitapta yazılı olduğu için de verileri kontrol etmeye bile zahmet etmiyorlar. İkincisi, von Neumann'ın ikna edici bu "kanıt"ının etkisiyle gerek bazı ders kitapları, gerekse kuantum kuramının pek çok popüler ve yarı popüler anlatımı hâlâ gizli değişken kuramlarının imkânsız olduğunu söylüyor, halbuki ta 1966'da Bell bu kanıtın hatalı olduğunu göstermişti. Onlara inanmayın. Gizli değişken kuramları (ya da yorumları) az sonra sözünü edeceğim tek bir şartla işe yarar hale *getirilebilir*. Şaşırtıcı olan şu ki, en azından bir kişi 1950'lerde böyle bir kuramı kurmaya teşebbüs etmekten korkmamış ve von Neumann'ın "kanıt"ıyla başına vurularak (mecazi anlamda) zorla boyun eğdirilmeyi kabul etmemiştir. Bu kişinin adı David Bohm'dur. Yıllar boyunca biraz yardım da alarak kuantum mekaniğinin Kopenhag Yorumu kadar iyi işleyen bir gizli değişkenler yorumunu geliştirmiştir. Fakat bu yorum tamamen farklı bir kuantum gerçekliği görüşü koyar ortaya.

Bölünmeyen Bütün

Bohm gerçekliğin doğasına dair kendi görüşünü *The Ghost in the Atom*'da Peierls'in görüşüyle keskin bir ayrımla özetlemiştir. Dış dünyanın bizim gözlemlerimizden bağımsız olarak var olup olmadığı sorulduğunda şöyle cevap vermiştir: "Her fizikçi gerçekten buna inanır." Daha sonra da şöyle devam etmiştir: "Evren bir bütün olarak bize bağlı değildir ... [zihnin] atomlar üzerinde önemli bir etkisi olduğunu sanmıyorum."[60]

59. *Reviews of Modern Physics* 65 (1993), s. 803.
60. Davies ve Brown, *The Ghost in the Atom*, s. 119-20.

Bohm'un kuantum öncülerinden sonraki bir kuşağın üyesi olması muhtemelen önemlidir. 1917'de doğmuş ve sistematik bir alternatif kuantum yorumu kurmaya Kopenhag Yorumu'nun sahnenin merkezine yerleşmesinden 20 sene sonra, 1950'lerin başlarında ancak başlamıştır. Amerika'da doğmuş ve Niels Bohr'un güçlü etkisinden gerçek anlamda bir okyanus mesafe uzakta yetişmiş olması da önemli bir etken olabilir.

Bohm'un önce sekiz yaşında bilimkurgu okuyarak bilime yöneldiğini, sonra da astronomi kitaplarını keşfettiğini öğrendiğimden beri ona karşı bir düşkünlüğüm var, zira bu, benim de ondan otuz yıl sonra bilimle ilgilenmeye başlama öyküme çok benziyor. İkinci Dünya Savaşı sırasında Bohm Kaliforniya'da Robert Oppenheimer' la çalışan bir ihtisas öğrencisiydi ve Manhattan Projesi'ne de küçük bir katkıda bulunmuştu. Daha sonra Princeton Üniversitesi'ne geçti ve Niels Bohr'un bakış açısından yola çıkarak kuantum kuramını açıklamaya çalışan bir kitap yazdı. Bohr'un nereye varmak istediğini anlamadığını fark etmesine ve kendi yorumunu geliştirmeye başlamasına yol açan şey işte bu standart yorumu açıklama teşebbüsüydü.

Bu asi görüşleri geliştirmeye başladığı sıralarda Bohm'un özel hayatı tam bir hengâme içindedir. Temsilciler Meclisi'nin Gayri Amerikan Faaliyetler Heyeti tarafından çağrılıp, Manhattan Projesi'nde çalışırken Berkeley'de tanımış olduğu bazı bilim insanlarının siyasi görüşleri hakkında ifade vermesi istenmiştir. Bu, 1940'ların sonlarında, ABD yönetiminin komünist köstebeklerin atom sırlarını Sovyetler Birliği'ne sızdırma ihtimali konusunda paranoyak olduğu Soğuk Savaş'ın ilk günlerinde gerçekleşir. Bohm tanıklığın tanığı suçlu çıkarabileceği durumda ifade vermeme hakkını koruyan anayasanın ek beşinci maddesine dayanarak, ilke olarak meslektaşlarının özel hayatları hakkındaki soruları cevaplamayı reddeder.

O sırada mesele küçük bir sansasyon yaratır, sonra unutulur. Fakat bir süre sonra komünist cadı avı tam gaz ilerlemeye başlar. İki yıl sonra Bohm Kongre'yi küçük düşürmekle suçlanıp mahkemeye çıkarılır; beraat etse de McCarthy döneminin başında duruşma sırasında üstüne atılan çamur çıkmamıştır ve ABD'de iş bulması imkânsız hale gelir. Avrupa'ya taşınır ve Londra'da Birkbeck College' a yerleşir. Burada sonraki kırk yıl boyunca kuantum yorumunu geliştirir.

Gayri Amerikan Faaliyetler Heyeti'ne verdiği cevaptan da anlaşılacağı gibi Bohm otoriteden gözü korkacak ya da resmi görüşe uyacak biri değildi (ki kendisine yapılan üstü kapalı suçlama düşünüldüğünde bu oldukça ironikti). Von Neumann'ın gizli değişken kuramlarının imkânsızlığını kanıtlamış olduğu iddiası Bohm'un bu yaklaşımı araştırmasına engel olmadı; von Neumann'ın argümanındaki hatayı bulmadı fakat işleyen bir gizli değişken kuramı oluşturarak böyle bir kuramın olması gerektiğini gösterdi. Durum ya buydu ya da Bohm'un kuramı yanlıştı. Bohm 1992'de, tam Kopenhag Yorumu'nun alternatifleri nihayet üç-beş fizikçiden fazlası tarafından ciddiye alınmaya başladığı sırada öldü, fakat Bell'in ikisinden hangisinin yanlış olduğunu ortaya koyuşunu görme mutluluğuna ermişti (Bell'in von Neumann'ın hatasını keşfetmiş olması tabii ki Bohm'un kuramının *doğru* olduğunu ispatlamaz, fakat önündeki önemli bir engeli ortadan kaldırır).

Bohm'un kuantum belirsizliği yorumuna göre parçacıkların daima belirgin konumları ve hızları vardır, fakat bu özellikleri ölçmeye yönelik her teşebbüs bu parçacıklarla ilintili pilot dalgayı değiştirerek onlar hakkındaki bilgiyi yok edecektir. Pilot dalgayı bir yerde dikizlemek (mesela bir elektronun konumunu ölçerek) pilot dalganın her yerdeki şeklini hemen değiştirecektir, bu da etkisi altındaki bütün parçacıklara yansıyacaktır.

Burada iki kilit kavram vardır. Birincisi, parçacıkları nasıl etkileyeceğini belirleyen pilot dalganın şekli olduğu için dalganın herhangi bir yerde ne kadar güçlü (ya da zayıf) olduğunun önemi yoktur. Dalga orada olduğu sürece onun şeklini değiştirmek parçacıkları etkileyecektir. İkincisi, pilot dalga tek bir yerdeki müdahaleye her yerde ve anında tepki verecektir. Dalganın kendisi yerbilmezdir.

Bu daha önce sözünü ettiğim tek şarttır. Bell 1966'da *yerbilmezliği kabul etmek şartıyla* gizli değişkenler kuramının işe yarayabileceğini kanıtlamıştır. Aspect deneyi yerbilmezliği iş başında gösteren tipik bir örnektir – bir fotonun kutuplanma durumunu ölçmek anında öteki fotonun kutuplanma durumunu belirler, isterse evrenin öteki ucunda dursun.

Ama tabii Aspect deneyini Kopenhag Yorumu çerçevesinde anlattığımı söyleyebilirsiniz. Doğrudur, öyle anlattım. Eğer Bell *sadece* gizli değişkenler kuramlarının yerbilmezliği kabullenmemizi

gerektirdiğini ispatlamış olsaydı o zaman böyle bir kuantum yorumunu terk etmek için çok güçlü bir neden olurdu. Ama öyle yapmadı. Onun bulduğu şey kuantum gerçekliğinin hangi yorumu olursa olsun yerbilmezliği içermesi gerektiğiydi!

Doğrusunu söylemek gerekirse bu, işi biraz basite indirgemek olur. Bell ünlü eşitsizliğinin ihlal edilmesi durumunda bunun "yerel gerçeklik" kavramını terk etmek anlamına geleceğini keşfetti. "Yerel" bu bağlamda ışıktan daha hızlı hiçbir iletişimin olmaması anlamına, "gerçeklik" ise dünyanın bizim gözlemlerimizden bağımsız olarak var olduğu anlamına gelir. Doğanın Bell eşitsizliğini ihlal ettiğini gösteren Aspect deneyi (ve o zamandan beri diğer deneyler) ikisinden birinin gitmesi gerektiğini göstermiştir. Bu ilk bakışta farkına vardığınızdan daha dramatik bir sonuçtur, zira Bell eşitsizliği aslında kuantum mekaniğine hiç dayalı değildir. Eğer Bell eşitsizliği ihlal edilirse (ki ediliyor) o zaman yerel gerçeklik terk edilmek zorundadır, *kuantum mekaniği tamamen yanlış bile olsa.* Aspect deneyinin sonucu evrenin "yerel ve gerçek" olmadığını gösterir, evrenin işleyişine dair *ne tür* bilimsel bir tarif hayal ederseniz edin. Eğer dışarıda gerçek bir dünya olduğuna inanmak istiyorsanız yerbilmezlik olmadan *edemezsiniz*; eğer ışık hızından daha hızlı bir iletişim biçimi olamayacağına inanmak istiyorsanız, gözlemciden bağımsız gerçek bir dünyaya sahip *olamazsınız.*

1928'de doğup 1990'da ölen Bell, kuantum öncülerinin muhteşem zamanlarına Bohm'a göre çok daha uzaktı ve insanların Kopenhag Yorumu'nu nasıl kolayca bir kutsal kitapmış gibi kabul ettiklerini anlayamıyordu. "Genelde göz ardı edilmiş ama benim için büyük bir gizem olan dalga-parçacık ikilemini bu kadar açık ve sıradan bir şekilde çözümleyen" parçacık *ve* dalganın birlikte işlediği de Broglie/Bohm fikri "bana çok doğal ve basit geliyor,"[61] diyordu Bell. Hem ışıktan daha hızlı giden etkiler fikrinden de hiç rahatsızlık duymuyordu, hatta bunun anlamı zamanda geriye gitmek olsa bile (ki öyleydi). Gerçeklik kavramından vazgeçmek yerine Einstein'ın özel görelilik kuramından vazgeçeceğini, gerekirse esir kavramına (ya da en azından tercih edilen bir referans çerçevesine) geri gideceğini söylemişti:

61. Bell, *Speakable and Unspeakable*, s. 191.

İnsan gerçekçi bir dünya görüşünü benimsemek istiyor, gözlemlenmezken bile dünya gerçekten oradaymış gibi hakkında konuşmak istiyor. Ben kesinlikle benden önce var olan, benden sonra da var olacak bir dünyaya ve sizin de onun bir parçası olduğunuza inanıyorum! Ayrıca fizikçilerin çoğunun filozoflar tarafından köşeye sıkıştırılırken bu görüşü savunduklarını sanıyorum.[62]

Bohm bu fikri daha da ileriye götürüp pilot dalga aracılığıyla her şeyin diğer her şeyle bağlantılı olduğunu ve diğer her şeyin başına gelen her şeyden (anında) etkilendiğini ileri sürmüştür. Ona göre görünüşte bağımsız, ortada bir bağlantı olmadan kendi işine bakan varlıklar aslında her şeyin altında yatan bir temel sürece karşılık vermektedir. Çok basitleştirilmiş bir örnek, bir dansçının bir sahnenin karşılıklı iki yanındaki perdelere spot ışıklarıyla düşmüş gölgesi olabilir. Dansçı sahnede hareket ederken gölgeler değişir. Eğer sadece gölgeleri görebilseydiniz birbirleriyle gizemli bir şekilde etkileşime girmiş gibi görünürlerdi, uzaktan etkide olduğu gibi; aslında ikisi de daha derindeki temel bir gerçekliğe tepki vermektedirler. Bohm fikirlerinin sonraki gelişiminde dünyanın basit temel düzeninin, birbiriyle kesişen sonsuz sayıda dalgadan oluşan bir alan olduğunu ileri sürmüştür. Dalgaların birbiriyle kesişmesi bizim parçacık olarak algıladığımız yerel etkileri yaratır.

Bütün bunlar, özellikle de evrenin her yerindeki şartların farkında olan ve parçacıklarını ona göre yönlendiren pilot dalga fikri, Richard Feynman'ın kuantum mekaniğine geçmişlerin-toplamı yaklaşımını çağrıştırır. "Foton" bir aynaya olası bütün yollardan gidip sonra yansımış bir resim yapmak için gözlerinize yolculuk eder demek yerine, "pilot dalga" her olası yoldan gider ve sonra fotona hangi yolu takip etmesi gerektiğini "söyler" diyebiliriz. Bohm'dan sadece bir yaş küçük olan Feynman da tabii ki Kopenhag yorumcularından hem zaman hem mekân açısından uzaktı ve Kopenhag Yorumu tesis edildikten onlarca yıl sonra yeni fikirlerle çıkageldi. Ne var ki, yakın zamana kadar Feynman'ın fikirleri Bohm'un fikirlerinden daha saygın gibi görünüyordu ("daha" saygın, ama bütünüyle saygın değil; şimdi bile kuantum sorunlarını çözmede geçmişlerin-toplamı yaklaşımı işe yarasa da pek çok bilim insanı tara-

62. Davies ve Brown, *The Ghost in the Atom*, s. 50.

fından tuhaf karşılanır). Fakat bu iki fikir de kuantum gerçekliğinin doğasına ilişkin bir başka tuhaf yorumla kavramsal olarak ilintilidir. Bu yorum sadece yerbilmezliği ya da bütün olası yolları takip eden fotonları değil, sonsuz bir *evrenler* dizisini içerir, her olası kuantum seçiminin her olası sonucunu yerine getiren ve bunu (söz konusu yorumun savunucuları tarafından her zaman kabul görmese de) kesin olarak yerbilmez bir biçimde yapan bir evrenler dizisini.

Evrenlerin Çoğalması

Malum (veya daha değilse bile çok yakında malum olacak) sebeplerden dolayı kuantum mekaniğinin "birçok dünya" yorumu diye bilinir bu. Uzun zamandır benim gözde yorumum olmuştur, kısmen Kopenhag Yorumu'ndan hiç etkilenmediğimden bu bana en iyi alternatif gibi geldiği, kısmen de bilimkurgu hikâyeleri yazmak için harika fırsatlar sunduğu için. Fakat birçok dünya yorumunun öyküsü popülerleştikçe daha da karmaşıklaştı ve sonuçta amip gibi bölünüp üç farklı birçok dünya yorumu oldu. Aynı zamanda, "Sonuç" bölümünde ele aldığım daha da iyi bir yorum çıkıp, son 40 yıldaki seçeneklerden hoşnut olmayanları etkiledi. Birçok dünya yorumu hakkında artık eskiden olduğu kadar heyecan duymuyorum; ama hâlâ en azından Kopenhag Yorumu kadar iyi ve hâlâ bilimkurgu öyküleri için sağlam, bereketli bir toprak sunuyor. Ve işte bütün ihtişamıyla karşınızda.

Birçok dünya kuramının temel fikrine göre evren bir tercihle her karşılaştığında bütün evren bütün olası seçenekleri gerçekleştirmek için kendisini o sayıda böler. Bunu gözde canlandırmanın kolay bir yolu Schrödinger'in bir kutudaki muhterem kedisini düşünmektedir. Bu kuantum düşünce deneyinde sadece iki seçenek vardır. Ya radyoaktif atom bozunur ve kedi ölür ya da bozunmaz ve kedi sağ kalır. Hatırlarsanız geleneksel Kopenhag Yorumu akıllı bir gözlemcinin kutuyu açıp bakmasına kadar *iki* seçeneğin de "gerçek" olmadığını söyler. Bu meydana gelene kadar kutunun içindeki her şey bir üst-üste-binme durumu içindedir, yani kedi gözlemlenene kadar ne sağdır ne de ölü. Birçok dünya yorumu ise *iki seçeneğin de* gerçeğe dönüştüğünü söyler, sistem bir tercihle karşı

karşıya kalır kalmaz evren ikiye bölünür. Evrenin bir kopyasında gözlemci kutuyu açar ve canlı bir kedi bulur, gerçekliğin öteki versiyonundaysa gözlemci kutuyu açar ve ölü bir kedi bulur. Fakat buradaki önemli nokta bu yorumda gözlemci bakmadan önce kedinin *gerçekten* canlı ya da ölü olmasıdır; gizemli bir üst-üste-binme durumu yoktur, gözlem anında çöken bir dalga fonksiyonu da yoktur. İki gözlemci de kendisinin tek bir evrende olduğunu düşünür ve bu iki evrendeki insanların birbirleriyle iletişim kurmasının hiçbir yolu yoktur.

Birçok dünya yorumu John Wheeler'ın danışmanlığı altında çalışan bir öğrenciyken Hugh Everett tarafından 1957'de geliştirildi. O sırada Wheeler bu fikri onaylamıştır – fakat bu kavram konusunda (mesela Wheeler-Feynman soğurma kuramına kıyasla) pek de heyecanlı olmadığının bir göstergesi, kendisi danışman, Everett ise öğrenci olmasına rağmen birçok dünya yorumunun bazen "Everett-Wheeler" kuramı diye anılması ama asla "Wheeler-Everett" kuramı olarak anılmamasıdır. Birkaç yıl sonra Wheeler birçok dünya yorumu hakkındaki görüşünü değiştirmiştir, makul her deney testinde Kopenhag Yorumu'yla tamamen aynı tahminlerde bulunsa da ciddiye alınmayacak kadar fazla "metafizik yük" taşıdığına karar vermiştir. Bu itiraz bir zevk meselesidir; bütün o üst-üste-binme durumu ve dalga fonksiyonunun çökmesi meseleleri de kendi metafizik yüklerini taşır ve bazı insanlar (ben de dahil) bu paketi içine sindirmeyi birçok dünya yorumundan daha zor bulur. Fakat Wheeler'ın haklı olduğu bir yan var.

Sorun şu ki birçok dünya yorumunun ilk haliyle sonsuz sayıda evrene ihtiyacı var, her biri saniyenin her kesrinde gerçekliğin sonsuz sayıda başka versiyonlarına bölünüyor, zira evren(ler)deki bütün atomlar ve parçacıklar kuantum seçenekleriyle karşı karşıya kalıp geleceğe doğru her olası yolu birden takip ederler. Bu bölünen evrenleri düşünmenin genel yolu insan odaklıdır – Amerika İç Savaşı'nı Güney'in kazandığı, komünistlerin Rusya'da asla iktidara gelmediği vb. durumların olduğu "paralel bir dünya" düşünülebilir. Dediğim gibi bilimkurgu yazarları için çok keyifli bir malzemedir, ayrıca görünüşe göre bu insani seviyede yeterince makuldür. Herkes tarihteki kilit bir olayın farklı bir biçimde meydana gelmiş olması durumunda "acaba ne olurdu?" diye spekülasyon yapmaya ba-

yılır. Fakat her bir minik kuantum seçeneğinin her tür biçimde son bulmasına izin vermeye kalktığımızda hâlâ o kadar makul müdür? Makul değilse ve evrenin çoğalmasının nedeni insan tarihini etkileyen büyük seçenekler ise o zaman yine kuantum dünyasıyla gündelik hayat arasındaki çizgiyi nereye koyacağımıza karar verme sorununa geri döneriz ve bir etkinin olabilmesi için kuantum seçeneğinin içerimlerinin akıllı bir gözlemci tarafından fark edilecek kadar büyük olması gerekip gerekmediği üzerine kafa yorar dururuz.

Bu güçlüklere rağmen bazı evrenbilimciler birçok dünya yorumuyla ilgilendiler ve Everett'in bu fikri bulmasından sonraki 30 yıl boyunca içinde çürüdüğü karanlıktan çıkardılar. Duydukları heyecanın sebebi birçok dünya kuramının önemli bir avantajıdır, zira bu kuram akıllı bir gözlemciye ya da dalga fonksiyonlarını çökertip gerçekliği gerçek kılmak için "sistem dışındaki" bir ölçüm aygıtına duyulan ihtiyacı ortadan kaldırır. Tekrar "Wigner'in arkadaşı" muammasına geri döndük – eğer Wigner'in arkadaşı kedi ölü mü canlı mı diye kutuya bakar ve kimseye söylemezse o zaman arkadaş *da* bir üst-üste-binme durumunda var olur, ta ki Wigner ona ne olduğunu sorana kadar. O zaman Wigner de başka bir gözlemci bu deneyin sonucunu kontrol etmek için ona sorana kadar bir üst-üstebinme durumunda var olur ve bu böyle sonsuza kadar devam eder. O halde evreni bir üst-üste-binme durumu değil de gerçek yapan şey nedir?

Wheeler'ın savunmaya çalıştığı şeye göre gözlemlerimiz (ya da herhangi bir akıllı gözlemcinin gözlemleri) şimdi bir biçimde geçmişe tepki gönderip evrenin dalga fonksiyonunu ta Büyük Patlama'ya kadar çökertebilir (bunu söyleyen de, birçok dünya yorumunun ciddiye alınmayacak kadar fazla "metafizik yük" taşıdığını ileri süren adam!). Fakat biz de sistemin bir parçası olduğumuzdan (buradaki sistem evrenin tamamı oluyor) bu sav biraz şüpheli. Evrenin bir üst-üste-binme durumunda değil de tek bir gerçeklik olarak var olması için Kopenhag Yorumu, harfiyen takip edersek, dalga fonksiyonlarının çökertilmesi için evrenin dışından bir gözlemcinin varlığını gerektirir. Bu yüzden bazı evrenbilimciler gerçekten birçok evrenin var olduğunu, her birinin kendi uzay ve zamanını kapladığını ve hepsinin kökeninin Büyük Patlama'ya kadar gittiğini iddia etmeyi tercih ederek birçok dünya yorumuna dönmüşler-

dir. Evren(ler)in ortaya çıkan matematiksel tanımı karmaşıktır, fakat bu yaklaşımla bazı başarılı sonuçlar alındığı iddia edilmiştir. Mesela Stephen Hawking gibi araştırmacılar bir anlamda birbirinin "yanı sıra" sonsuz farklılıkta evren olsa da, en yaygın evren türünün, dolayısıyla içinde bulunma ihtimalimizin yüksek olduğu evrenin fiilen içinde yaşadığımız evrene çok benzer olması gerektiğini ileri sürmüşlerdir.

Birçok dünya fikrini 1990'larda en hararetle savunan fizikçi muhtemelen Oxford Üniversitesi'nden David Deutsch'tur. Bunu "kuantum kuramının en basit yorumu"[63] olarak tanımlar ve iki delik deneyinde olup bitenlerin farklı bir açıklamasını sunmak için birçok dünya yorumunun bir versiyonunu kullanır.

Aynı deneyi alışıldık biçimde tek tek fotonlarla yapıp girişim örüntüsü elde ederseniz, bundan, düzenekteki iki delikten de *bir şeyin* geçmiş olduğu yorumunu çıkarmak doğal geliyor. Çeşitli yorumlar bu bir şeyi olasılık dalgası ya da pilot dalga veya fotonun kendisinin gizemli bir biçimde iki (ya da daha fazla) yerde birden var olduğu biçiminde tarif ediyor, oysa ne zaman hangi yarıktan geçtiğini görmek için baksak daima bütün fotonu tek bir yarıkta buluyoruz (tabii girişim örüntüsü de kayboluyor). Deutsch girişimin tamamen adeta "öteki" yarıktan hayalet fotonlar geçiyormuş ve girişim örüntüsü meydana getirmek için bizim gerçek fotonlarımızla girişim yapıyormuş gibi meydana geldiğine işaret ediyor (tabii biz bakmazken). Sonra bu ekstra fotonların hiç de "hayalet" olmadığını, bunların yan komşu evrendeki alternatif kuantum yollarını takip eden gerçek fotonlar olduğunu söylüyor.

Deutsch'a göre iki delik deneyinde bir foton iki yarıktan birisinden geçme seçeneğiyle karşı karşıya kalınca evren ikiye bölünür, gerçekliğin bir versiyonunda foton bir yoldan, ötekisinde de öteki yoldan gider. Ama biz fotonun geçmiş olabileceği iki olası yolu tekrar bir araya getirip girişim yapmalarını ve girişim örüntüsü meydana getirmelerini sağlarız. Deutsch'a göre, böyle yapınca gerçekliğin iki versiyonunu tekrar birleştirmiş oluruz – ki bu, Everett'in orijinal

63. Davies ve Brown, *The Ghost in the Atom*, s. 84. Aynı söyleşide Paul Davies birçok dünya yorumunun "varsayımda ucuz, evrenlerde pahalı" olduğu yorumunda bulunur.

fikrine göre hoş bir gelişmedir. Bu iki versiyon sadece fotonun düzenekten geçtiği sırada ayrı gerçeklikler olarak var olur. İki delik deneyinde her seferinde bir foton fırlatıldığında bile girişimi gözlemleyişimiz Deutsch tarafından evrensel tema üzerindeki bütün olası kuantum çeşitlemelerinin bir şekilde gerçekten "yan yana" var olduğunun kanıtı olarak görülür. Böyle ifade edilince birçok dünya yorumu Feynman'ın "geçmişler-toplamı" yaklaşımının bir çeşitlemesi gibi görünür. Fakat alternatif geçmişler ne kadar gerçektir?

Deutsch başka evrenlerin gerçekten var olup olmadığını bize gösterebilecek bir deney düşünmüş. Bu deneyi gerçekleştirmek henüz mümkün değil, fakat eğer bilgisayar teknolojisi bu hızla ilerlemeye devam ederse 20-30 yıl sonra mümkün olabilir – bir insan ömrü içinde kesin olur.

Deutsch'un önerisi kuantum seviyesinde olup bitenlerin doğrudan farkına varacak bir elektronik beyin inşa etmektir. Sonra bu süper-beyine bir ölçümün iki eşit olası sonucu olduğu bir kuantum sistemini gözlemleme görevi verilir – mesela bir fotonun kutuplanma ölçümü, ki düzeneğin kurulma biçimine göre söz konusu foton iki yönden birine yönelmek zorundadır. Deutsch'un birçok dünya kuramı versiyonu doğruysa, süper-beyin kendisini iki kopya halinde ayırır ve her bir kopya ölçümün olası iki sonucundan birini kaydeder. Fakat süper-beyin tam olarak ne gözlemlediğini not etmek yerine iki olası sonuçtan birini, sadece birini gözlemlediği bilgisini kaydeder.

Beyin iki paralel gerçeklikte tamamen aynı şeyi yazıp tek bir gerçekliği gözlemlediğine tanıklık eder. Sonra bu iki gerçeklik bir tür girişim süreciyle (mesela fotonun kutuplanma durumlarını yine karıştırarak) tekrar bir araya getirilir. Deutsch'a göre, "eğer geleneksel yorum doğruysa", kuantum ölçümü sırasında dalga fonksiyonları çökeceği ve hiçbir girişim olmayacağı için "[süper-beynin] karar aşamaları sırasında bir an evrenlerin biri dışında hepsi ortadan kalkmış olur". Fakat birçok dünya yorumu doğruysa o zaman, beyin tek bir ara gerçekliği gözlemlediğini hatırlasa da, yine bir girişim olur. Ama beyin iki ara olasılıktan her birini bu şekilde hatırlamaz; sadece tek bir ara kuantum durumunu gözlemlediğini hatırlar! Eğer *hangi* ara durumu gözlemlediğini yazmış olsa (fotonun hangi delikten geçtiğini gözlemeyle tamamen eşdeğer) o gerçeklik

kurulmuş olup girişimi yaratmak için tekrar muadiliyle bir araya getirilemezdi. "O iki olasılıktan hangisini gözlemlediğini hafızadan silmesi, [süper-beynin] yaptığı öteki şeylerin zorunlu sonucudur."[64] Deneyin sonucu –girişim– iki ara durumun da birlikte var olmasını içerir, ama tek "bir" durumda olduğu anısı vardır. O yüzden evren ikiye bölünmüş olsa gerektir.

Cazip yalınlığına rağmen (evren sayısında değilse de varsayımları bakımından), bütün birçok dünya kuramı versiyonlarının karşısında hâlâ pek çok sorun vardır. En çarpıcı olanı her zamankinden daha fazla yerbilmez oluşudur – eğer iki delik deneyini gerçekleştirip girişimin oluşmasına izin verirsek o zaman Deutsch'un versiyonuna göre bölünmeyi ve tekrar birleşmeyi laboratuvarımızın bir köşesinde meydana gelen büsbütün yerel bir olay olarak görebilirsiniz, evrenin geri kalan bölümüne de hiçbir etkisi olmaz. Fakat fotonun hangi delikten geçtiğini görmek için bakarsak, girişim örüntüsünün oluşmasını önleriz, bu da evrenin, fotonun her bir yolu için bir tane olmak üzere, bölünüp kendinden iki kopya oluşturduğu anlamına gelir. Belki de fotonun hangi delikten geçtiğinin evrenin bütününe hiçbir etkisi yoktur; fakat yine de ilke olarak bu bölünme bütün evren(ler)in kuantum durumunu anında değiştirir.

Deutsch'un bunu dert eder gibi bir hali yoktur, bunun sebebi kısmen bizim geçmişten şu ana gelip geleceğe doğru akan bir şey olarak gördüğümüz gündelik zaman kavrayışımızdan çok farklı bir görüşe sahip olmasıdır. *The Fabric of Reality* (Gerçekliğin Dokusu) adlı kitabında zaman "akışı" diye bir şey olmadığını ve öznel olması dışında tek bir şimdiki an'ın olmadığını ileri sürer. Eğer zaman gerçekten "aksa", der Deutsch (1930'larda J.W.Dunne tarafından ileri sürülmüş savı tekrar ederek), o zaman "şimdi"nin bir andan ötekine gidişini ölçmek için kullanılacak ikinci bir tür zamanın olması gerekir, bir de o zamanı ölçecek üçüncü bir tür zaman ve bu böyle devam eder. Geçmişle gelecek arasında farklılıklar olabilir –bir insanın bebek, çocuk ve yetişkinken çekilmiş bir dizi fotoğrafı kolayca doğru sıraya konulabilir– fakat bu illa da bir şeyin geçmişten geleceğe aktığı anlamına gelmez. Deutsch büyük bir hayal gücü atılı-

64. Bu paragraftakileri alıntılar Davies ve Brown, *The Ghost in the Atom*, s. 99 ve 100'den.

mıyla, başka zamanların fotoğraflarıyla başka evrenlerin fotoğrafları arasında temel bir farklılık olmadığını ileri sürer; "geçmiş" ve "gelecek" Everett'in birçok dünyasının özel vakalarıdır.

Bu bizi derin sulara çekiyor fakat şu anda bu sulara dalmak istemiyorum. Deutsch'un birçok dünya teması üzerindeki çeşitlemesinin kuantum gerçekliğini anlamanın en iyi yolu olduğuna inanmadığım için bu fikirlerin bizim zaman anlayışımız açısından neler ima ettiği konusunda ayrıntılara girmenin anlamı yok gibi görünüyor.

Deutsch'un argümanından ikna olmayışımın bir sebebi, gerçeklik konusunda hâlâ ölçümlere ve gözlemlere (ve akla) özel bir rol veriyor gibi görünmesidir. Eğer "süper-beyin" deneyi, beyin hangisi olduğunu belirtmeksizin sadece tek bir gerçekliği gördüğünü yazarken girişim yaratır, ama öte yandan hangi gerçekliği gözlemlediğini yazarken girişim yaratmazsa, o zaman bakmadığımızda deney düzeneğinde "iki yoldan" birden geçen, baktığımızdaysa sadece birinden geçen foton bilmecesiyle tekrar karşı karşıya kalırız. Ben şahsen Everett'in kuramının naif versiyonunu tercih ederim. Buna göre evren gerçekliğin bir sürü farklı versiyonuna –birbirleriyle iletişim kuramayacak biçimde– bölünür. Fakat başka bir şeye geçmeden önce bu temel tema üzerinde bahsedilmesi gereken başka çeşitlemeler de var.

Bir Kuantum Teması Üzerine Çeşitlemeler

Schrödinger'in Kedisinin Peşinde'yi yazdığımdan beri birçok dünya kuramı kuantum yorumundaki gelişen alanlardan biri oldu, büyük oranda daha önce sözünü ettiğim kozmolojik sorunlardan dolayı. 1990'ların ortasında bu fikirler hakkında söylenenler esas olarak bu tema üzerinde birbiriyle ilintili iki çeşitlemeye dairdi: "birçok zihin" ve "birçok geçmiş" yorumları.

Birçok dünya yorumunun açtığı olanaklara olan ilgiye ilişkin bir fikir vermek için bu alanda çalışma yapmış araştırmacıların bir kısmına şöyle bir göz gezdirmek yararlı olabilir. Oxford'dan David Deutsch'tan zaten söz etmiştim; diğerleri şunlar: Dieter Zeh ve Ernst Joos (Heidelberg Üniversitesi), Claus Keifer (Zürih Kuramsal Fizik Enstitüsü), Jonathan Halliwell (Massachusetts Teknoloji Enstitü-

sü), Wojciech Zurek (Los Alamos Ulusal Laboratuvarı), Thanu Padmanabhan (Tata Enstitüsü, Bombay), Murray Gell-Mann (CalTech), James Hartle (Kaliforniya Üniversitesi, Santa Barbara), David Albert (Columbia Üniversitesi) ve Barry Loewer (Rutgers Üniversitesi). *Physics Today* dergisi Zurek'in bu alandaki çalışmasının bir yönüyle ilgili bir makalesini yayımladığında o kadar çok mektup gelmişti ki, sırf *Physics Today*'in yayımlamak için seçtikleri ve Zurek'in cevabı derginin sekiz sayfasını kapladı. 1990'ların fizik dünyasındaki bu fikirlere gerçekten de *büyük* ilgi var!

Zurek'in o makalesi kuantum gerçekliğine olan bu yaklaşımların bazılarının bir yanını, "eş-evresizlik" diye adlandırılan bir fenomeni tarif ediyordu. Bu bizim herhangi bir kuantum sistemi hakkında geçekten sahip olduğumuz bilgi miktarıyla ve o sistemin kuantum durumunu tam olarak belirtmek için gerekecek bilgi miktarıyla ilgili bir şey.

Bir elektronu düşünün mesela. Bir hidrojen atomunun elektronunun durumu sadece üç rakamla tamamen belirtilebilir. Bunlar üç "serbestlik derecesi"ne karşılık gelir (basitleştirmek için elektronun *spin*'ini göz ardı ediyorum). Bu aynen bir odadaki uçan balonun konumunun sadece üç sayıyla belirtilmesi gibidir: iki bitişik duvara olan dik uzaklığı ve yere olan uzaklığı. Daha karmaşık sistemleri belirtmek için daha fazla parametre gerekir, çünkü daha fazla serbestlik derecelerine sahiptirler. Genel olarak kuantum durumunu belirlemek için sistemdeki parçacık sayısının üç katı kadar sayı gerekir.

Padmanabhan herkes anlasın diye geleneksel kedi örneğini kullanmıştır.[65] Bir kilo ağırlığındaki bir kedinin yaklaşık 10^{26} atom içermesi gerektiğine işaret eder, bu bakımdan, her bir elektronun tek tek ne yaptığı sorusunu bile bir kenara bıraksak kedinin kuantum durumunu belirtmek için bu sayının üç katına ihtiyacımız vardır. Bizim bu kediyi tarif edişimiz bu seviyede işe yaramaz ve "odanın köşesinde oturan bir kedi var" dediğimizde bu tanıma uyacak pek çok kuantum durumu vardır.

Bu fikrin savunucularına göre, pek çok serbestlik derecesini göz ardı etmenin etkisi o nesnenin –burada kedinin– bir kuantum nesnesi gibi değil, "klasik" bir nesne gibi davranmasına yol açar.

65. *New Scientist*, 10 Ekim 1992.

Serbestlik derecelerini göz ardı ederek nesnelerin klasik biçimde davranmasına "sebep" oluruz. Bu yorumun destekçilerine göre bu durum iki delik deneyinde de geçerlidir. Fotonun bir delikten geçtiğini görmek için baktığımızda öteki deliğin varlığını göz ardı ederek sistemin klasik biçimde davranmasına sebep oluruz; fotonun iki deliği de "görmesine" izin verirsek o zaman deneyi tarif etmek için elde olan bütün bilgiyi kullanıyoruz demektir ve bu yüzden sistem kuantum mekaniğine uygun hareket eder.

Sistemin iç parametrelerinden ne kadar çoğunu göz ardı edersek, sistem o ölçüde klasik biçimde davranır. Bu kurama göre bir kediyi belirtecek bütün parametreleri ölçen bir deney kurabilseydik bir kedinin de bir elektron kadar kuantum mekaniğine uygun davrandığını, hem ölü hem diri olarak karma bir durumda var olabildiğini keşfederdik.[66]

Şeylerin klasik biçimde hareket etmesi bizim bilgisizliğimizden kaynaklanır ve daha çok kuantum varlığından meydana gelmiş daha büyük nesneler hakkındaki bilgisizliğimiz daha da büyüktür. Doğal olarak bazı araştırmacılar bu "eş-evresizliğin" bütün evrenin klasik bir sistem gibi davranmasını açıklayan iyi bir yol olduğu kanısına vardılar.

"Birçok geçmiş" de işte burada devreye giriyor. Zurek evrenin şu an nasıl olduğu ile bir grup kararlı atom ve kararsız radyoaktif atoma olanlar arasında bir analoji kurar. Zaman geçtikçe kararsız atomlar bozunup nükleer süreçler sonucu daha uzun ömürlü atomlara dönüşürler. Böylece, nasıl bir karışımla başlarsak başlayalım son ürün bir grup kararlı atomdur. Kuantum mekaniği Büyük Patlama'dan "çıkan" evrenin pek çok farklı kuantum durumu olasılığını düşünmemize izin verir. Zurek'e göre "Sadece belli kararlı durumlar sahnede kalacaktır". Hangi çeşitlemenin hayatta kalacağı, kendileriyle fiilen ne kadar iyi bağlantı kurduklarına bağlıdır – tutarlı bir hikâye anlatan geçmişler içsel olarak tahmin edilemez geçmişlerden daha iyi hayatta kalır. Bunlar tamamen en yakın olarak klasik tariflerle temsil edilen geçmişlerdir. Zurek buna "öngörülebilirlik eleği" der ve "öngörülebilirlik eleğiyle seçilmiş saf durumlar[ın] bildik eş-evreli durumlara dönüşece[ğini]" söyler.[67]

66. Padmanabhan, *New Scientist*, 10 Ekim 1992.
67. *Physics Today*, Nisan 1993.

Padmanabhan'ın söylediklerine göre evrenin klasikmiş gibi davranmasının sebebi bizim birçok başka evrenden haberdar olmayışımızdır – "birçok geçmiş" buradan gelir. İşte yine Feynman'ın geçmişler-toplamı yaklaşımını çok çağrıştıran şeyler. Ne var ki burada yeni bir malzeme vardır: algıladığımız geçmişin *tutarlı* olması gerekliliği. Belleğimizle geçmiş olayların kayıtları arasındaki bağlantı Zurek'in yorumunda temel bir yer tutar. Bu tabloda, algıladığımız şey bütün evrenin dalga fonksiyonu değil, gözlemcinin dünyayı tanımlamasında yer alan bütün olaylarla tutarlı bir dalının –daha doğrusu bir deste dalın– birkaç tipik özelliğidir. Gözlemciler, kendilerince bilinmeyen, akıp giden başka geçmişler olmasına rağmen bazı şeyleri hatırlayabilirler ve evrenin geçmişinin ne olduğu konusunda başka gözlemcilerle hemfikir olabilirler.

1993'ün sonlarında kuantum fizikçileri, tarih gerçekten var mıdır yoksa sadece birbiriyle tutarlı mevcut belleklerin bir toplamı mıdır, sorusunun cevabını ortaya koyacak gerçekleştirilebilir bir deney önerdiler. Bu, Bell eşitsizliğinin zamansal dengiydi. Bazı fizikçiler Bell'in zamandaki tek bir anda meydana gelen ayrılmış olayların tarifinin tersine çevrilerek zamanda art arda ama aynı yerde –aynı kuantum sisteminde– meydana gelen olayları tarif etmede kullanılabileceğini iler sürdüler. New Mexico'daki Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'ndan Juan Paz ve Santa Fe Enstitüsü'nden Günter Mahler bunun tarihin gerçekten sağduyunun bize söylediği biçimde var olup olmadığını belirleyecek uygulanabilir bir deneye dönüştürülebileceğini göstermiştir.

Önerilen deneyde tıpatıp benzeri olarak hazırlanmış sistemlerde yapılan bir dizi kontrollü ölçüm söz konusudur. İdeal adaylar, açık seçik elektron enerji seviyelerine sahip ve önceden benzer kuantum deneylerinde kullanılmış olan berilyum iyonlarıdır – Üçüncü Bölüm'de sözü edilen "kuantum Zenon etkisi". Fakat bu sefer berilyum iyonlarına bağlı elektronlar yaklaşık *dört* enerji seviyesi arasında sıçratılacaktır.

Önce, seçilmiş iki enerji seviyesi arasında sürekli elektron salınımını sağlamak için, sonra da bu iki seviyenin her birinden iki yüksek enerji seviyesinden birine sıçrama yaratmak için lazer ışığı kullanılarak iyonlar hazırlanır. "Zamansal Bell eşitsizliği" kendilerini farklı enerji seviyelerinde bulan elektronların sayısının, belli bir

biçimde çeşitli olası geçişlerin tetiklenme sırasına bağlı olacağını öngörür.

Bu uygulanabilir bir deneydir. Paz ve Mahler sistemin son durumunun ölçümlerinin, sistemin o duruma nasıl vardığını ortaya koyabileceğini göstermiştir. Sağduyuya göre süreklilige sahip bir geçmişin olması gerekir. Elektronların net bir şekilde belirlenmiş bir sırayla çeşitli durumlardan geçerek ilk durumlarından son durumlarına varmaları gerekir. Nasıl ki Bell, denklemlerini sağduyuya uyacak biçimde kurmuşsa (böylece Bell eşitsizliğinin *ihlali* "hayalet işi uzaktan etki"nin gerçekten var olduğunu ispat eder), bu denklemi tarif eden dengi denklemler sağduyuyla uyumlu biçimde kurulmuştur. Eğer deneyin sonucu "zamansal Bell eşitsizliği"yle aynı olursa, o zaman kuantum dünyasını sağduyu yönetiyor demektir. Ama zamansal Bell eşitsizliği ihlal edilmişse bu bize net bir şekilde tanımlanmış "ara" durumların olmadığını gösterecektir – Paz ve Mahler'in ifadesiyle "fiili ölçüm olayları (başlangıçtaki hazırlık ile durumun son okuması) arasındaki geçmişler gerçekliğin bir unsuru değildir".[68]

Bell testinin uzamsal versiyonuyla analoji kurarsak, eğer eşitsizlik ihlal edilirse o zaman kuantum olayları hiçbir ara durumdan geçmeksizin zamanda birbirleriyle (başlangıç ve nihai durumlar arasında) ilintilenecektir (zaman içinde bir "yol"u olmaksızın). Aspect deneyi adeta aralarında uzam yokmuş gibi davranan kuantum varlıklarını gösterir; yeni deney ise (kuantum dünyası hakkında öğrendiğimiz her şey yanlış değilse) aralarındaki zaman yokmuş gibi davranan kuantum varlıklarını gösterecektir.

Kuantum fizikçilerinin deney gerçekleştirildiğinde eşitsizliğin ihlal edilmesini *beklemeleri* bizim için artık sürpriz olmasa gerek. Aslında, deney pratik bakımdan kuantum kazanı seyretme deneyine çok benzer olduğu için siz bu satırları okuduğunuz sırada deney çoktan gerçekleştirilmiş olabilir; sonucun sağduyuyla uyumlu değil kuantum fiziğinin söylediği gibi çıkacağından eminim.

Bu, göründüğü kadar endişe verici bir şey değildir, çünkü temel olarak saf bir kuantum sisteminin bir özelliğidir. "Eş-evresizlik" fikri doğruysa, pek çok kuantum parçacığının (insan ya da kedi gi-

68. *Physical Review Letters* 71 (1993), s. 3235.

bi) bulunduğu bir sistemde "kuantumluk" bulanıklaşabilir. O bakımdan Paz ve Mahler'e göre "çevreyle olan etkileşimin gücünü artırarak zamansal Bell eşitsizliğinin ihlalleri ortadan kaldırılabilir"[69] ve geçmiş, bir elektron için değilse bile tarihçi için gerçek olabilir.

Fakat, kuantum fiziğinde hep olduğu gibi başka yorumlar da vardır; örneğin bir düşünce okulu tarihçilerin (ve diğer hepimizin) tutarlı bir geçmişi "hatırlayabileceğini" ama bunun illa da tek ve emsalsiz bir tarihin *geçmişte var olduğu* anlamına gelmeyeceğini ileri sürer. Alternatif "birçok zihin" fikri büyük oranda David Albert' in çalışmasıyla devreye girer. Onun fikrine göre akıllı bir varlık bir kuantum sistemiyle etkileşime girince, akıllı varlığın kendi beyni kuantum sisteminin karmaşıklığınca belirlenen bir karmaşıklığa ulaşır. Deutsch'un varsayımsal süper-beyni gibi, her olası kuantum alternatifini "görmek" için kaça bölünmesi gerekiyorsa o sayıda kendini böler, fakat her bölünmüş bilinç deneyin tek bir sonucunun farkındadır. Albert'e göre kutudaki kedi deneyini gerçekleştirirseniz kutunun kapağını açtığınızda deneyin iki sonucunu da gerçekten görürsünüz, ikisi de beyniniz tarafından "gerçek" olarak kaydedilir. Fakat beyninizin iki yanı deney hakkındaki duygularını ve inançlarını asla birbirleriyle paylaşamaz.

Bu görüşü ciddiye almakta çok zorlanıyorum. Bir kere, bilinci ve aklı kuantum tartışmasının ortasına getirip koyuyor. Ayrıca, kuantum dünyasının temel özelliklerinden birini, yani deney sonucunun olasılığa dayalı doğasının ayağını kaydırıyor gibi görünüyor. Eğer her olasılık benim zihinlerimden biri tarafından gerçek olarak yaşanıyorsa, o zaman bir sonucun olasılığının diğer bir sonucun olasılığından fazla olduğunu söylemek ne anlam ifade eder? Bu fikirleri ciddiye alacak olursak gerçekten son çareler diyarına giriyoruz demektir; ayrıca henüz mevcut kuantum yorumlarının hepsine bakmadık. Gerçeklik modellerimizden *herhangi biri* ciddiye alınabilir mi diye sormadan önce sözünü etmek istediğim bir-iki model daha var.

69. Paz ve Mahler, *Physical Review Letters* 71 (1993), s. 3235.

Çaresizlikten Doğan Açıklamalar

Sıradışılık peşindeyseniz Roger Penrose'dan başkasına bakmanıza gerek yok. Penrose *Kralın Yeni Usu* adlı kitabında "Bir 'ölçüm'ün *fiilen* yer alabilmesi için bilinçli bir varlığın mevcudiyeti gerekiyor mu?" gibi makul bir soru sorar ve makul cevabı kendisi verir: "Sanırım kuantum fizikçilerinden sadece küçük bir azınlık buna evet diyecektir" (s. 227). Sonra da elektron gibi bir parçacığın uzayda tek bir noktada yoğunlaşmış olmayıp etrafa yayıldığını kabul ederek kuantum teması üzerindeki kendi çeşitlemesini geliştirmeye başlar. İnsanlar elektrondansa "olasılığı" etrafa yayılmış olarak düşünmeyi tercih edebilirler, der Penrose ve 252. sayfada şunu ileri sürer: Fakat iki delik deneyinde "parçacığın gerçekten aynı anda *iki* yerde birden 'olduğunu' kabul etmemiz gerekir! Bu görüşe göre parçacık *fiilen iki yarıktan birden geçmiştir.*" Ama vardığı sonuca göre "kuantum kuramının muammalarının çözümü, geliştirilmiş bir kuram bulmamızda yatar" (s. 298) ve burada doğrudan yerbilmezlik muammasına dikkat çeker.

Yerbilmezlik diğer "makul" kuantum kuramı yorumlarının çoğunun en büyük derdidir. Fikirlerden biri, iki delik deneyinden geçen tek bir elektron örneğinde olduğu gibi bireysel kuantum süreçlerinde neler olduğunu tarif etme yaklaşımından tümden vazgeçip, kuantum mekaniğini çok sayıdaki bu tür ölçümlerde ("topluluk" olarak) ne olduğunu tarif eden tamamen istatistiksel bir kuram olarak görmektir. Topluluk yorumuna göre, (mesela) bin radyoaktif atomun bir yarı-ömür sonunda gözlemlendiğinde ne olacağını sorabiliriz ve bu durumda yarısının bozunmuş yarısının da bozunmamış olacağı (doğru) cevabını alırız. Fakat, bir yarı-ömürden sonra tek bir radyoaktif atoma ne olduğu sorusunu sormamıza bile izin yoktur.

Bu yaklaşım kuantum fizikçilerinin sadece büyük sayıda kuantum varlıklarıyla ilgilenebildiği 30-40 yıl öncesinde mantıklı gelmiş olabilir – fakat fotonların tek tek fırlatılıp birbirleriyle girişim yaptıklarının görüldüğü bu zamanda biraz aptalca geliyor. Yine de, (başkalarının yanı sıra) örneğin Londra King's College'dan John Taylor tarafından onaylanıyor: "Başka hiçbir yorum tatmin edici değil," özellikle de "birçok dünya yorumunu bir garabet olarak gö-

rüyorum. Üzgünüm ama ben dik kafalı bir fizikçiyim. Öteki evrenlerde neler olup bittiği hakkında bir fikir sahibi olunamıyorsa o zaman bu konu gündeme getirilmemelidir."[70]

Kuantum gizemlerini çözmek için yapılan daha da umutsuz bir teşebbüs (bence) John von Neumann'ın 1930'larda öncülüğünü ettiği bir yaklaşımdır. Buna göre gündelik mantık kuantum dünyasına uygulanamaz. Gündelik mantığa 1815-1864 yılları arasında yaşamış olan İrlandalı matematikçi George Boole'a istinaden Boole mantığı denir. Boole, tamamen mantıksal işlemleri tarif etmek için sembolik dil ve notasyon kullanan ilk kişidir. Bu fikirlerden gelişen matematiksel mantıkta "ve" ve "ya da" matematiksel sembollerle gösterilir ve mantıksal argümanlar matematik denklemleri gibi yazılabilir. Kuantum gizemlerini çözmedeki "Kuantum mantığı" yaklaşımı "ve" ve "ya da" gibi terimlerin kuantum dünyasındaki anlamlarının gündelik hayattaki anlamlarıyla aynı olmadığını söyler. Bu yüzden bir fotona iki delikten birisinden geçme seçeneğini sunmak farklı bir mantıksal önem kazanır. Heinz Pagels'in, beyni kuantum mantığıyla işleyecek biçimde düzenlenmiş bir insanın kuantum dünyasının muammalarına tepkisini tarif eden yorumuna ekleyecek bir şeyim yok:

> Onlara iki delik deneyini anlatsak bize sadece gülümserler – sorunun ne olduğu hakkında hiçbir fikirleri yoktur. Şimdi kuantum mantığının sorununun ne olduğunu anlıyoruz – bildiğimiz Boole mantığından daha kısıtlayıcıdır. Kuantum mantığıyla diğeri kadar çok şey ispat edemezsiniz, fiziksel dünyada herhangi bir tuhaflık hissetmeyişinizin sebebi de budur. Kuantum mantığını benimsemek, dünyanın yuvarlak olduğuna dair bir kanıtla karşılaşınca dünyanın düz olduğunu iddia etmek için yeni bir mantık icat etmeye benzer.[71]

John Bell tarafından ileri sürülmüş çok daha ilginç bir fikir de, pilot dalgayla Everett'in kuramı arasında hiçbir farkın olmadığı fikridir.[72] Everett'in başlangıçtaki önerisinin can damarı her gözlemcinin "kuantum bellek durumu" tarafından tanımlandığı ve az çok tutarlı bir "geçmiş"i hatırladığıydı. Gerçekliğin dallara ayrılması, pa-

70. Davies ve Brown, *The Ghost in the Atom*, s. 109, 106.
71. Pagels, *The Cosmic Code*, s. 180.
72. Bell, *Speakable and Unspeakable*, Bölüm 15.

ralel evrenlerin katlanarak çoğalması fikri Everett'in argümanında daha sonra ortaya çıkmıştı, ki Bell bunun başarısız ve gereksiz bir ekleme olduğunu ileri sürüyordu. Ona göre Everett'in fikrinde dikkate alınacak önemli nokta şuydu: Geçmişe değil sadece anılara ulaşabiliriz, anılar da evrenin anlık (bu yüzden de yerbilmez) kuantum durumunun bir parçasıdır.

Bell'e göre "evrenlerin katlanarak çoğalması aklın sınırlarını aşan bir fikir"dir ve dalga fonksiyonunun tarif ettiği *potansiyel* bir gerçeklikler dizisi fikri hâlâ elde tutulmak suretiyle "rahatça vazgeçilebilir." Bu, zamanda herhangi bir anda dalgaya bağlı sadece bir değişkenler grubu "gerçekleştiği" halde, dalganın kendisinin asla yerelleşmediği ya da "indirgenmediği" pilot dalga kuramına benzer. Her evrenin gerçek olması gerekliliği, diyor Bell, bir elektromanyetik alanın olduğu uzaydaki her noktada yüklü bir parçacık bulmayı ummak gibidir. Everett yorumu, gerçekliği, farklı konfigürasyonların eşleştirilmesi olmaksızın kuantum dalga denkleminin bütün olası çözümlerinin bir dağılımı olarak tarif eder ve Bell de yorumun bu yönünü vurgular. Farklı konfigürasyonların eşleştirilmesi olmayınca (Deutsch'un ele aldığı tema) zaman "akışı" olmaz, "belli bir şimdiki zamanla belli bir geçmiş arasında bağlantı yoktur" ve:

> Dalga fonksiyonunun yapısı temelde ağaç gibi değildir. Şimdiki zamandaki belli bir dalı geçmişteki ya da gelecekteki belli bir dalla birleştirmez. Dahası, önceden farklı olan dalların kaynaşmasını ve ortaya çıkan girişim fenomenlerini kuantum mekaniğinin tipik özelliği olarak görmek mantıklı geliyor. Bu bakımdan, ağaca benzer bir karaktere sahip olmayan doğru tablo Feynman'ın "geçmişler toplamı" fikridir.

Fakat Bell birçok dünya fikrini savunmak için yazmıyordu bunları, sadece bu fikri elinden geldiğince açık bir biçimde gözler önüne seriyordu. Bell şöyle diyordu: "Everett'in geçmişin yerine anıları koyması radikal bir tekbenciliktir – zaman boyutuna da uzanarak kafam dışındaki her şeyin yerini izlenimlerim alır ... eğer böyle bir kuram ciddiye alınırsa, başka hiçbir şeyi ciddiye almak pek mümkün olmaz." Oysa Bell bile bu kavramı tümden bir kenara atamıyordu. Daha sonra aynı kitapta (s. 194) şöyle söyler: "Bunu gülünç diyerek bir kenara atabilirdim. Yine de... 'Einstein Podolsky Rosen'

muammasıyla bağlantılı olarak belirgin bir şey söyleyebilir ve kanımca gerçekten öyle mi diye görmek için bunun hassas bir versiyonunu formüle etmeye değer." Bunu söyleyen kişi (aynı sayfada), "Şu tamamlayıcılığın sırrına bir türlü eremedim, çelişkiler hakkındaki rahatsızlığım da sürüyor," deyip von Neumann'ın gizli-değişkensiz argümanını "gülünç" olarak elinin tersiyle itmekten de korkmamışsa, o zaman bu, birçok dünya yorumunun onaylandığı anlamına çok yaklaşır. Oysa Bell aslında sadece kavramsal açıdan yalın ve net olan pilot dalga tablosunu onaylamıştır, ki bu kuram kuantum dünyasının temel unsuru olan yerbilmezliği gözler önüne sermiş ve böylece gerçekten tatminkâr sayılabilecek her kuramın hâlâ çözmesi gereken soruna dikkat çekmiştir.

Birçok dünya yorumu hakkındaki bu farklı perspektife tekrar dönmemin iki sebebi var. İlki, geleneksel yorumlar arasında hâlâ en beğendiğim yorum bu. Eğer şu ana kadar çerçevesi çizilmiş bütün fikirlerden birini seçmek zorunda kalsaydım "en cazip teklif" bu olurdu. İkincisi, Bell'in, gerçekliğin birçok dünya versiyonunu açıklayışı (ve daha az etkili olmakla birlikte Deutsch'un bu fikirleri geliştirmesi) zamanın, kuantum dünyasına dair anlayışımızı şekillendirmedeki rolünü açık seçik ortaya koyuyor. Zamanın çok incelikli bir özelliği vardır ve bu özellik gerek kuantum gerçekliğinin doğasıyla gerekse kuantum mekaniği denklemlerini gündelik hayatın denklemleriyle uzlaştırma sorunuyla yakından ilgilidir.

Bu, kuantum muammalarını çözmeyle ilgili tamamen farklı bir yaklaşıma yol açmıştır. Bu yaklaşım gündelik hayattaki yasalarla başlayıp bir tür kuantum hakikatine varmaya çalışır. Fakat bu yeni yaklaşıma bakmadan önce biraz konudan sapıp kuantum mekaniği ile görelilik kuramı arasındaki etkileşime göz atmak yerinde olur. Evrenin işleyişinin gerçekten iyi bir tarifi (aranılan "her şeyin kuramı") belli ki bu iki büyük kuramı tutarlı bir biçimde bir araya getirme yolunu bulmak zorunda kalacaktır, ama ele almak istediğim konu bu değil. Daha ziyade, bu iki kuramın birbiriyle uyuşmaz göründüğü yerlere bir bakmak istiyorum – ya da en azından, kuantum kuramının *özel* görelilik kuramıyla uyuşmaz göründüğü yere.

Göreci İç Monolog

Bir kere daha sorun Bell tarafından açık seçik ortaya konmuştur. Özel görelilik kuramının esas fikri evrenin ve fizik kurallarının, nasıl hareket ettikleri önemli olmaksızın bütün gözlemciler için aynı görünmesi gerektiğidir (fakat unutmayın, özel görelilik kuramında sadece sabit hızlardan bahsediyoruz, ivmelerden değil). İkinci Bölüm'de gördüğümüz gibi, Einstein kendi katkısını sunmadan önceki yıllarda bu fenomenleri araştıran tek kişi Lorentz olmasa da bu ilke "Lorentz değişmezliği" diye bilinir. Aspect deneyi bize yerel gerçekliği terk etmemiz gerektiğini söyler, ayrıca ya "oradaki" evren gerçek değildir ya da ışıktan hızlı bir iletişim biçimi vardır, Einstein'ın "hayalet işi uzaktan etki"si. Bell bulmacanın "en ucuz çözümü"nün Einstein'ın versiyonundan önce var olan görelilik türüne, Lorentz gibi insanların gerçekten esir diye bir şeyin var olduğu varsayımına dayanarak kurdukları kurama geri dönmek olduğunu öne sürdü.[73]

Bu fikirlere göre gerçekten tercih edilmiş bir referans çerçevesi vardır, fakat bizim ölçüm aletlerimiz hareketten öyle etkilenir ki esir "içinden" geçen (ya da "ona göreli") hareketi tespit edemeyiz. Şeylere böyle bakmanın anlamı şudur ki, tercihli bir referans çerçevesi olduğundan, bu tercihli çerçevede şeyler ışıktan hızlı gidebilse de, etkilerin hem ışıktan hızlı hem de zamanda geriye gidiyor gibi göründüğü başka referans çerçevelerinde bu bir tür optik yanılsamadır. Eğer tercihli bir referans çerçevesi varsa, bu tercihli çerçevedeki saatler tercihli bir zaman hızında ilerleyecektir – böylece Newton'un hem mutlak uzayı hem de mutlak zamanı bir çırpıda tekrar yerine gelir. Işıktan hızlı gitmek, sadece bütün Lorentz çerçevelerinin birbirine denk olduğu Einstein'ın görelilik versiyonunda "gerçekten" zamanda geriye gitmek anlamına gelir.

Bell bu fikirleri *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*'in (Kuantum Mekaniğinde Söylenebilenler ve Söylenemeyenler) Dokuzuncu Bölümü'nü oluşturan bir makalede geliştirmiştir. Einstein öncesi döneme ait tercihli referans çerçevesi fikrini

73. Davies ve Brown, *The Ghost in the Atom*, s. 48 vd.

kullanmanın nasıl Lorentz dönüşüm denklemlerinin her zamanki biçimine götürdüğünü göstermiştir, böylece "aynı biçimde hareket eden iki sistemden hangisinin gerçekten durduğunu, hangisinin hareket halinde olduğunu deneyle belirlemek mümkün değildir" (s. 77). Einstein'ın kuramı Bell'in işaret ettiği gibi Lorentz'in versiyonundan felsefesi ve tarzı bakımdan ayrılır. Felsefi fark şudur ki, hareket ediyor görünen iki sistemden hangisinin gerçekten durduğunu, hangisinin hareket ettiğini bilmek imkânsız olduğundan "gerçekten durmak" ve "gerçekten hareket etmek" ifadelerinin hiçbir anlamı yoktur ve sadece göreli hareket önemlidir. Tarzdaki fark şudur ki, Einstein fizik yasalarının aynı biçimde hareket eden herkese aynı görünmesi gerektiği hipotezinden yola çıkar ve aynı yere daha uzun bir yolu takip etmek yerine Lorentz dönüşümlerinin basit ve zarif bir biçimde kaynağına iner. Kopenhag Yorumu ve mesela birçok dünya yorumu kuantum sorunlarına nasıl aynı "cevapları" veriyorsa, Lorentz'in görelilik versiyonuyla Einstein'ın özel görelilik kuramı da bütün pratik durumlarda aynı "cevapları" verir. Fakat olup bitenlerin farklı yorumlarını sunarlar.

Bell'in önerisi bakış açınıza bağlı olarak ya devrim yaratıcı ya da gerici nitelikte. Bugünkü fizikçiler arasında genel kabul görmediği kesin. Gerçi Bell'in muzip bir biçimde işaret ettiği gibi Einstein'dan önceki göreliliğe gitmeden yerbilmezlik ikileminden kurtulmanın en azından bir yolu var. Bell, Paul Davies'e şöyle söylemişti: "Bu meseleyi anlamanın yollarından biri dünyanın süper-belirlenimci olduğunu söylemektir."[74] Başka bir deyişle her şey mutlak olarak önceden belirlenmiştir, deneycinin Aspect deneyinde hangi ölçümleri yapacağının seçimi de dahil. Eğer özgür irade tamamen bir yanılsamaysa bu bizi krizden kurtarır. Fakat böyle bir kuram ciddiye alınacak olursa...

Özel görelilik kuramının dünyaya bakmanın en iyi yolu olmayabileceğini ileri sürmek büyük bir şok yaratmasa gerek, zira adından da anlaşılacağı gibi görelilik kuramlarındaki son söz değildir. Tamamlanmamıştır, çünkü genel göreliliğin aksine, ivmeli hareket ya da kütle çekimini ele almaz.

74. Davies and Brown, *The Ghost in the Atom*, s. 47.

Şimdi, genel görelilik kuramının ayrıntılarına girmeyeceğime söz vermiştim, fakat bu yalnızca bir iç monolog olduğundan sadece birkaç belirgin özelliğinden bahsederek bu sözü biraz esnetmiş olacağım. Genel kuramla tarif edilen kütle çekimi uzay-zamanın bükülmesi olarak gösterilir. Güneşten gelen ve dünyayı yörüngesinde tutan bir tür gizemli "uzaktan etki" (yani kütle çekimi) yerine güneşin uzay-zamanda bir "çukur" açtığını düşünmeye teşvik ediliriz, gerilmiş bir lastik tabaka üzerinde bovling topunun yapacağı türden bir çukur. Dünya, bükülmüş uzay-zamanda en az dirençli bir hattı takip ederek güneşin yörüngesine yerleşir, bovling topunun yarattığı çukur etrafında yuvarlanan bir bilye gibi.

İlke olarak, güneşin (ya da herhangi bir şeyin) kütle çekimsel etkisi evren içinde sonsuza dek uzanır, ama güneşin sebep olduğu uzay-zaman bükülmesi güneşten uzaklaştıkça küçülür. Uzay-zaman içinde kütleleri sağa sola sarsarak ışık hızında yayılan halkacıklar (gerilmiş lastik tabakada bovling topunu aşağı yukarı sallayarak elde edeceğiniz türden halkacıklar) halinde kütle çekimsel etkide değişiklikler elde edilebilir; bu kütle çekimsel dalgalar Einstein'ın genel kuramının öngördüğü bir şeydir ve ikili atarca adı verilen bir sistem üzerinde yakın zamanda yapılan incelemeler sonucu var olduğu doğrulanmıştır. Bu sistemde birbirinin yörüngesindeki iki yoğun yıldız kütle çekimsel ışıma biçiminde o kadar çok enerji kaybeder ki yörüngelerini tamamlama zamanları ölçülebilir derecede değişir. Yörüngenin değişme miktarı genel kuramın öngörüsüyle tamamen örtüşür. Bu keşif o kadar önemli görüldü ki bunu bulan araştırmacılar (Russell Hulse ve Joe Taylor) bu çalışmalarından dolayı 1993'te Nobel Ödülü aldılar.

Fakat kütle çekimsel ışıma ışık hızıyla hareket etse de bir nesnenin kütle çekimsel etkisinin yerbilmez gibi göründüğü bir durum vardır. Genel tabloda kütle çekim alanı uzayda her tarafa (uzay-zamanda her tarafa) her "zaman" yayılır. Bu, bilim insanlarını çok uzun yıllardır dönem dönem endişelendiren başka bir gizemle ilintili olabilir – yani eylemsizlik bilmecesiyle. Uzayda sürtünme yokken bir nesneyi iterseniz başka bir itiş olmadığı takdirde ittiğiniz yönde hareket etmeye devam eder. Bir nesnenin yön değiştirmesi, daha hızlı gitmesi ya da yavaşlaması için enerji gerekir. Bu o kadar önemli bir noktadır ki Lorentz'in sabit hızla hareket eden değişmez

gözlemci referans çerçevelerine genelde "eylemsizlik çerçeveleri" denir. Fakat nesne, hareketinin değiştiğini (ya da değişmediğini) nasıl "bilir"?

Neredeyse boş olan bir evrende hareket anlamsız olurdu; hareketin kendisiyle kıyaslanarak ölçülebileceği bir referans noktası olmazdı. Fakat, evrende başka bir parçacık olur olmaz hareketin kıyaslanarak ölçülebileceği bir şey çıkar. Evrende sadece tek bir parçacık olsaydı eylemsizliğe nasıl sahip olabilirdi ki? Peki sadece bir parçacık daha eklemek ilk parçacığın tam eylemsizliğinin "şalterini mi açar"? Yoksa eklenen parçacık sayısı arttıkça eylemsizlik de mi artar? Kimse bilmiyor. Fakat bildiğimiz haliyle evrende gerçek nesnelerin fiili davranışı –itilip çekilmeye verdikleri ilk tepki– öyle gösteriyor ki, nesneler hızlarını evrendeki bütün maddenin ortalama konumuna göre "ölçüyorlar".

Bu, Avustralyalı fizikçi Ernst Mach'a (1838-1916) istinaden "Mach İlkesi" olarak bilinir ve genel görelilik kuramını geliştirirken Einstein'ın üzerinde önemli bir etkide bulunmuştur. Burada ironik olan şey şudur ki, Einstein'ın çabalarına rağmen genel kuram Mach ilkesini ya da eylemsizliğin kökenini gerçekten açıklamaz; iki kere ironik olansa, Einstein'a ilham vermiş olmasına rağmen Mach'ın Einstein'ın kuramını beğenmemiş olmasıdır. Muamma çözülmeden kalmıştır. İtilen bir nesne nasıl oluyor da o itmenin hareketini evrendeki bütün maddeye göre nasıl etkileyeceğini *anında* hesaplıyor ve ona göre davranıyor? Yine uzaktan etkinin hayaletli diyarlarına döndük – kuantum kuramında değil, Einstein'ın kendi başyapıtı genel görelilik kuramı bağlamında!

Işıktan hızlı haberleşmeyi yasaklayan özel görelilik kuramı evrenin tamamlanmamış bir kuramı olarak bilinir; Bell'in de açıkladığı gibi, tüm pratik amaçlar açısından ışıktan hızlı haberleşmeye izin veren Lorentz kuramıyla aynıdır. Öte yandan, özel görelilik kuramından çok daha tatminkâr olan çok yönlü genel görelilik kuramı bir şekilde yapısında yerbilmezliği barındırıyor gibidir. Ve fark ettiğinize eminim, Mach ilkesinin altında bir hakikat varsa o zaman evrende tercihli referans çerçevesi *var* demektir, fiziksel bir esir var olsun ya da olmasın.

Evrenin genişlediğini biliyoruz. Evrendeki bütün maddenin ortalama dağılımının belirttiği tercihli referans çerçevesi, genişleme-

nin bütün yönlerde kusursuz bir aynılıkta ilerlediği çerçevedir. Aynı zamanda evrenin doğduğu Büyük Patlama'nın evreni elektromanyetik ışımayla dolduran sıcak bir ateş topu olduğunu da biliyoruz. Bu ışıma o zamandan bu yana soğuyup 3K'nin (–270 °C) hemen altında bir sıcaklığa sahip olan evreni bugün de hâlâ dolduran zayıf bir radyo dalgası gürültüsü haline gelmiştir – ünlü kozmik mikrodalga fon ışıması. Işık (bütün elektromanyetik ışımaya "ışık" denebilmesi anlamında) tercihli referans çerçevesini bize kendisi sağlar.

Olay örgüsü güzel bir biçimde karışıyor, bu temalardan bazılarına daha sonra tekrar değineceğim. Ama önce kuantum mekaniğinin eski bilmecelerine yeni bir bakış.

Zaman Deneyi

Zamanın doğası dünyanın bilimsel olarak anlaşılması açısından temel niteliktedir. Kuantum fiziğinde evrenin "ölçülmemiş" durumu bütün olası durumların bir üst-üste-binme halidir ve fizik (ilke olarak) *bütün* bu olası durumları hesaba katmak zorundadır. Deutsch ve başkalarının geliştirdiği birçok dünya kuramının modern versiyonunda bütün olasılıklar "daima" var olduğu için evrenlerin dallara ayrılması söz konusu değildir – birbiriyle tıpatıp aynı "başlayan" sonsuz sayıda evren vardır. Kuantum ölçümü süreci bir evrenin bölünmesine sebep olmaz, fakat alternatif evrenleri farklı biçimlerde değiştirir çünkü deneyin sonucu farklı evrenlerde farklıdır – birinde kedi yaşar, komşu evrende kedi ölüdür, fakat *iki* evrende *de* deney başlamadan önce canlı bir kedi vardır (aslında deney gerçekleştirilene kadar iki evren birbirinden *ayırt edilemez*). Bu durumda "zaman oku" sadece birçok evrenin bazı durumlarının ötekilerden daha karmaşık olması anlamında vardır. Karmaşıklık –pek çok farklı kuantum ölçümünün sonuçları– gelecekte yatar, basitlik ise geçmişte.

Fakat pek çok parçacık bir arada tutulup etkileşimlerine izin verildiğinde sistemin karmaşıklığıyla ilgili özellikler (genellikle fiziğin termodinamik adıyla bilinen dalıyla anlatılır) sahneye çıkar, işte zaman okunun ortaya çıktığı yer de burası gibi görünür. Klasik örnekte, masadan düşen bir cam bardak yere çarpınca parçalanır ve

düşmekle kazandığı enerji ısı olarak dağılıp yeri biraz ısıtır. Yerdeki döşemenin enerjiyi kırık cam parçalarına verip onları tekrar bir araya getirip yukarı iterek tekrar masanın üzerine sıçratıp yeri hafif soğuttuğuna hiç şahit olmayız. Oysa, atom ve molekül seviyesinde dinamik denklemleri (hem Newton hem kuantum denklemleri) bu yönde de gayet güzel "işler".

Karmaşıklık ve zaman oku sorunu ve kaostan düzenin ortaya çıkma biçimi özellikle Ilya Prigogine tarafından ele alınmıştır. Prigogine 1917'de Rusya'da doğmuş ama on iki yaşından itibaren Belçika'da yaşamıştır; 1977'de Nobel Kimya Ödülü'nü kazanmış ve o zamandan beri enerjisinin çoğunu evrenin nasıl işlediğinin yeni yorumuna adamıştır. Dengesiz sistemler için matematiksel modeller geliştiren Prigogine'nin bu çalışmasının hayatın kökeni ve evrimiyle, (belki de) ayrıca kuantum ölçümü sırasında olup bitenlerle doğrudan bir ilgisi vardır.

Prigogine'nin argümanının özüne göre, karmaşık sistemlerin davranışı temel alınarak deneysel olarak türetilmiş termodinamik yasaları hakiki gerçekliktir; öte yandan, birbiriyle çarpışıp duran küçük kürelerin görünüşte zamansal simetriye sahip davranışı (atomların davranışının naif resmi) gerçekliğe sadece yakın bir şeydir. Göründükleri haliyle kabul edilmesi gereken, Newton yasaları (hatta Schrödinger'in denklemi) değil, termodinamik yasalarıdır. Sistemler Newton yasalarını (diyelim ki) tamamen takip ettiğinde onlara "entegre edilebilir" denir; tek başına duran bir yıldızın çevresindeki tek bir gezegen entegre edilebilirdir, dolayısıyla, şayet yörüngeyi ve gezegenin konumunu tarif eden mevcut parametreler biliniyorsa, gezegenin konumu gelecekteki ya da geçmişteki herhangi bir zamanda hesaplanabilir. Fakat sisteme sadece bir nesne daha ekleyip "üç kütleli" bir problem yaratırsanız denklemler artık entegre edilebilir değildir.

Mesele daha fazla madde söz konusu olduğunda matematik denklemlerinin gittikçe zorlaşması değildir; ilke olarak bile bunların kesin bir çözümünü bulmak *imkânsızdır*. Gelecekte belli bir zamanda bu üç maddenin her birinin nerede olacağına dair makul ölçüde doğru olan yaklaşık hesaplar yapmak küçük aşamalarla mümkündür. Yapmanız gereken iki maddeyi duruyor gibi düşünüp ötekinin onların birleşmiş kütle çekimsel etkisi altında nasıl hareket ede-

ceğini çözmektir. Ama onu sadece birazcık oynatır, sonra "hareketsiz tutup" öteki maddelerden birinin bir sonraki minik hareketini çözersiniz. Sonra bu işlemi üçüncü madde için tekrarlarsınız ve bu böyle devam eder. Hızlı bilgisayarlara rağmen bu çok bıktırıcı bir işlemdir, ayrıca tam da doğru çıkmaz. Aslında güneş sistemindeki gezegenlerin yörüngelerinde gayet güzel işe yarar, ama bunun sebebi güneşin gezegenlerin hepsinden (hatta hepsinin toplamından) çok daha büyük olması, dolayısıyla da etkisinin hesaplamalara hâkim olmasıdır. Eğer her bir gezegen güneşin kütlesi kadar bir kütleye sahip olsaydı hesaplamaları yaklaşık olarak bile yapmak çok daha zor olurdu. Ötekileri durgun tuttuğunuzda minik hareketlerini hesapladığınız her bir "gezegen"in sırasına bağlı olarak farklı "cevaplar" elde ederdiniz. Aslında, güneş sistemimiz gibi karmaşık bir sistemin gezegenleri şöyle dursun, herhangi üç maddenin yörüngelerinin zamanla nasıl evrileceğini tam olarak tahmin etmenin hiçbir yolu yoktur – keza, bu yörüngelerin geçmişten evrilerek bugün oldukları hale nasıl geldiklerini tam olarak hesaplamanın da bir yolu yoktur.

Etkileşim içinde olan sadece üç nesne olduğunda bile bu böyledir. Hatırlarsanız bir kedide sadece üç tane değil 10^{26} "parçacık" bulunuyor! Kuantum kuramının güzel, zamansal olarak simetrik denklemleri etkileşim içinde olan iki-üç varlığa uygulanabilir, fakat Prigogine'ye göre "entegre edilemezlik" herhangi bir gerçekçi karmaşık sistem için temel bir özelliktir. Eğer bir şey entegre edilebilir değilse, ilke olarak bile olsa geçmişini takip etmek için zamanda geriye *sarılamaz*. Kırık cam bardak tekrar eski haline *getirilemez*, yerdeki atomlar soğurken ona enerji pompalamak için işbirliğine girişseler bile.

Bir anlamda Prigogine'nin yaklaşımı orijinal Kopenhag Yorumu gibi bir şeyi tekrar gündeme getirir. Fizikte önemli olan şeyler, der Prigogine, gerçek, "klasik" cihazlarla yaptığımız ölçümlerdir (Geiger sayacı ve diğerleri), ama cihazın içinde olanlar ancak yaklaşık olarak anlayabileceğimiz bir şeydir. Alastair Rae'nin dediği gibi:

> Tanım gereği, tespit edilmemiş hiçbir tersinir, saf kuantum "olayı"yla karşılaşmadık. ... Klasik fizik yasaları, olaylar tersinir olsa da, ne meydana gelmiş olduğu hakkında konuşmanın daima mümkün olduğu yönündeki sorgulanmamış varsayıma dayanarak kurulmuştur. Einstein'ın görelilik

kuramı bile geniş ölçüde, tersinmez ölçüm işlemleri oldukları gayet açık olan sinyal gönderimi işlemlerine atıfta bulunur. Belki de olası gözlemler diyarından tersinir süreçlere giden bir senaryo yazmaya çalışırken, modellerimizin dalga-parçacık ikiliği ve EPR deneylerinde gözlemlenen uzamsal yersizleştirme gibi bariz çelişkiler içermesine pek şaşırmamamız gerekir.[75]

Bunlar merak uyandıran yeni fikirler, herkes tarafından kabul edilmiş olmaktan çok uzak olsalar da önümüzdeki yirmi-otuz sene içinde şu ya da bu şekilde tartışılacakları ve geliştirilecekleri kesin. Kopenhag Yorumu'nda önemli olanın –bir "ölçüm"ün kuantum dünyasının hangi yöne sıçrayacağına karar verdiği noktanın– evrende tersinmez bir değişimin (mesela bir kedinin ölümü ya da daha sıradan bir örnekle, bir kayıt cihazında kalemin bıraktığı iz) kurulması olduğu olasılığı üzerine vurgu yapılır. Buradaki pürüz bence Rae' nin sözünü ettiği o EPR deneylerinde gözlemlenen yerbilmezliğin burada gerçekten tatminkâr bir açıklamasının olmamasıdır. Kuantum dünyasının bizi şaşırtmasını beklememiz gerektiğini söylemek güzel hoş da, Prigogine'nin yaklaşımında *kendi başına* bir yerbilmezliğin belirtisi yoktur, oysa (iki delik deneyinde ve Aspect deneyinde ortaya çıkan) yerbilmezlik kuantum gizemlerinin tam da can damarıdır. Cambridge Üniversitesi'nden Nobel ödüllü fizikçi Brian Josephson'ın belirttiği gibi, Bell eşitsizliğinin gerçek dünyada ihlal edildiğinin deneysel kanıtı, son zamanlarda fizikteki en önemli gelişmedir.[76] Ne var ki, ölçme eyleminin tarifini nasıl yorumlarsanız yorumlayın A fotonu üzerinde yapılan bir ölçümün evrenin öteki ucunda bulunan B fotonunun durumunu *anında* belirlediği hâlâ bir gerçektir.

Yani Prigogine'nin yaklaşımı hâlâ benim için en uygun seçim değil. Fakat tersinirlik sorununun ve bazı temel denklemlerin zaman simetrili davranışının, kuantum gerçekliğinin iyi anlaşılmasını sağlamakta kilit öneme sahip olduğuna katılıyorum. Rae, Prigogine'den gayet yerinde bir alıntı daha yapar: "Temel bir parçacık, isminin aksine, 'verilmiş' bir nesne değildir; onu bizim inşa etmemiz gerekir."[77]

75. Rae, *Quantum Physics*, s. 109.
76. Aktaran Davies ve Brown, *The Ghost in the Atom*, s. 45; tam kaynak verilmemiş.
77. Aktaran Rae, *Quantum Physics*, s. 109; tam kaynak verilmemiş.

Burada önemli olan şu ki, kuantum dünyasına dair bildiğimiz her şey gündelik hayattaki şeylerin gözlemlerine ve sonuç çıkarmalara dayanıyor. Fizikçiler modelleri dikkate alır, bunların temel gerçekliğe yakın tahminler olduğunu umarlar. Fakat sık sık o modellerle gerçekliği birbirinden ayırt etmeyi unuturlar; bu arada önyargılarımız ve kültürel etkiler de dünyanın işleyişine ilişkin düşünme biçimimize yön verir. Kuantum dünyası hakkında gerçekten ne anladığımızı (tabii bir şey anlıyorsak) değerlendirmek için "anlamak" tan kastımızın ne olduğunu anlamaya çalışmamız gerekir. Merak etmeyin; gizemciliğin, felsefenin ve psikolojinin bulanık sularına dalıyor değilim. Ama yine de raftaki çeşitli kuantum gerçeklikleri ni değerlendirip en cazip teklifin hangisi olduğunu ve bunun nedenini belirlemeden önce şeyler hakkında nasıl düşündüğümüze genel olarak bakmamız yerinde olur.

Beşinci Bölüm

Şeyler Hakkında Düşünmek Hakkında Düşünmek

Fizikçilerin dünyası fotonlardan yapılmıştır. Bu, iki bakımdan doğrudur. Birincisi, gündelik şeyler atomlardan yapılmıştır. Yakın çevremizi ve vücudumuzun işleyişini anlamak için daha incelikli varlıkları boş yere dert etmemize gerek yoktur. Fakat atom elektromanyetik kuvvetlerle –foton alışverişi sayesinde– bir arada tutulan neredeyse tamamen boş uzaydır. Pozitif yüklü tipik bir atom çekirdeğinin çapı 10^{-15} metredir, ama atomun kendisi yüz bin kere daha büyük olup çapı 10^{-10} metredir. Eğer çekirdeğin çapı 1 cm olsaydı, çekirdekten onu çevreleyen elektronların bulunduğu dış kabuğa olan mesafe bir kilometre olurdu. Atomun dış yüzü, yani öteki atomlarla etkileştiği kısmı, KED'in işleyişiyle uygun olarak elektromanyetik kuvvetin bir arada tuttuğu saf elektrikten –elektronlardan– ibarettir.

Bu kelimeleri yazdığım bilgisayar bana katı bir nesne gibi geliyor; ama aslında birbirinden çok mesafeli birkaç minik kuantum varlığını birleştiren bir elektromanyetik kuvvetler ağıdır – etkileşim içindeki fotonlar kafesidir. Fakat bilgisayarı katı bir nesne olarak "hissetmek"ten ya da onu süreğen bir varlık gibi "görmek"ten ne kastediyorum?

Bir şeye dokunup onu hissettiğimizde –parmaklarımla klavyenin tuşlarına dokunduğumda parmaklarım bir tepki hisseder– gerçekte hissettiğimiz şey o nesnedeki elektron bulutuyla parmak uçlarımızdaki elektron bulutu arasındaki etkileşimlerdir. Bunlar fotonları içeren elektromanyetik etkileşimlerdir. Şeylere baktığımızda tabii ki onları gözlerimizdeki foton ve atomlar (daha doğrusu o atomların dış kısımlarındaki elektronlar) arasındaki etkileşimler aracılığıyla görürüz. Ne hissettiğimize ve gördüğümüze (ya da işit-

tiğimize, kokladığımıza, tattığımıza) ilişkin mesajlar beyne ulaşırken, elektrik darbesi kullanan sinir ağlarından geçer. Daha önce gördüğümüz gibi bu sinir darbeleri sinaps denilen aralıkları geçerler, bunu yapabilmek için de kimyasal tepkimeleri harekete geçirirler. Fakat kimyasal tepkimelerin kendileri atomların dış kısımlarındaki elektronların yer aldığı süreçlerden ibaret olup elektromanyetizmanın kuantum süreçleriyle yönlendirilirler. Beyinlerimizin işleyişi de aynı türden bir kimyaya bağlıdır – yani foton alışverişine.

Bu sınırlamalarla bile insan duyuları atom içindeki kuantum dünyasını araştırmak için uygun değildir. Parçacıkların doğrudan görülmesi, tadılması, koklanması ya da dokunulması mümkün değildir; daha ziyade etkileşimleri az çok karmaşık makineler yardımıyla izlenir ve özellikleri bir kadrandan ya da fotoğraftaki izlerden veya bilgisayarın saydığı sayılardan okunarak çıkarılır. Manyetik bir alanda hapsedilmiş tek bir atomu "görmek" artık mümkün dediğimizde bile aslında söylemek istediğimiz doğru yerden doğru rengin ışığını gördüğümüzdür. Bu ışık, atom adını verdiğimiz ve duyularımıza yardımcı olan şu ya da bu tür bir makineyi kullanarak yaptığımız pek çok deney ve gözlemle yapısını çıkarsadığımız bir varlığın mevcudiyeti olarak açıklanır. Bizim atom dediğimiz varlık aslında gerçekliğin kuramsal bir *modelidir*. Atomu oluşturan şeyler hakkında söylediklerim –pozitif yüklü çekirdek, elektron bulutu, foton alışverişi– hem geçmiş gözlemleri açıklayan hem de gelecekteki deneylerde neler olacağını önceden tahmin etmeyi mümkün kılan, kendi içinde tutarlı bir hikâyenin parçasıdır. Fakat atomun ne "olduğu" hakkındaki anlayışımız son birkaç yüzyılda defalarca değişmiştir ve farklı bağlamlarda farklı resimler (farklı modeller) bugün hâlâ işe yarar.

"Atom" adının kendisi eski Yunandan, maddenin nihai, bölünemez parçası fikrinden gelmektedir. 19. yüzyılın sonuna gelindiğinde atomların bölünmez olmadığı ve atomlardan parçalar (elektronlar) koparılabildiği gösterilmişti. Daha sonra, çekirdeğin merkezde durduğu ve elektronların da adeta güneşin etrafındaki gezegenler gibi onun çevresinde yörüngelendiği bir atom modeli geliştirildi. Bu model elektronların bir yörüngeden ötekine "sıçrama"sını, bunu yaparken elektromanyetik enerji soğurmasını ya da yaymasını ve bir tayfta o tür bir atoma (elemente) has çizgiler yaratmasını hâlâ gayet güzel açıklamaktadır. Ama daha sonra elektronları dalga

ya da olasılık bulutları gibi tanımlamak moda oldu (çünkü bu fikirler atomların davranışının aksi halde muammalı görünen özelliklerini açıklayabiliyordu) ve kuantum fizikçileri için eski yörüngesel modelin yerini aldı. Ama bu illa da atomların "gerçekten" elektron olasılık bulutlarıyla çevrili olduğu ya da öteki bütün modellerin geçersiz olduğu anlamına gelmez.

Fizikçiler bir gazın gündelik anlamda tamamen fiziksel davranışıyla –mesela bir kabın çeperlerine uyguladığı basınçla– ilgilenirken gaza küçük, sert bir "bilardo topu" muamelesi yapmaktan memnundurlar. Kimyacılar bir maddenin bileşimini belirlemek için küçük bir numune yakıp tayfta beliren çizgileri analiz ederken elektronların çekirdek etrafında yörüngelendiği "gezegen" modeliyle düşünmekten gayet mutludurlar. Ne var ki Nick Herbert, *Quantum Reality* (Kuantum Gerçekliği) adlı kitabında, kendisinden beklenmeyecek biçimde bu modeli reddeder:

> Oğlum bana dünyanın neyden yapıldığını sorduğunda kendimden gayet emin bir şekilde maddenin temelde atomlardan yapıldığını söylüyorum. Fakat, bana atomların nasıl bir şey olduğunu sorduğunda, hayatımın yarısını bu soruyu araştırarak geçirmiş olmama rağmen cevaplayamıyorum. Lise öğrencilerine atomun popüler gezegen modelinin resmini çizdiğimde –atom gerçekliği "uzmanı" olarak– kendimi nasıl da sahtekâr hissediyorum; onların dedelerinin zamanında bile bunun bir yalan olduğu biliniyordu.[78]

Peki yalan mıydı? *Şimdi* yalan mı? Hayır! En azından diğer atom modellerinden daha fazla değil. Herbert kendine, o dedelere ve genel olarak fizikçilere fazla acımasız davranıyor. Gezegen modeli kendi sınırlamaları içinde hâlâ tamamen tatminkâr biçimde işliyor, tıpkı bilardo topu modelinin *kendi* sınırları içinde gayet iyi işlemesi gibi. Bütün atom modelleri atomlar hakkında tek, emsalsiz hakikati temsil etmediği anlamında yalandır; fakat bütün modeller doğrudur ve işe yarar, yeter ki atom dünyasının bazı yanlarını kavramamıza vesile olsun.

Mesele sadece atomun "gerçekten" ne olduğunu bilmiyor olmamız değil, atomun "gerçekten" ne olduğunu hiç *bilemeyecek* olmamızdır. Sadece bir atomun neye *benzediğini* bilebiliriz. Onu çeşitli

78. Herbert, *Quantum Reality*, s. 197.

yollarla inceleyip bazı şartlarda bir bilardo topu "gibi" olduğunu buluruz. Başka bir biçimde araştırırız ve onun güneş sistemi "gibi" olduğunu buluruz. Başka birtakım sorular sorarız ve çevresi bulanık bir elektron bulutuyla kaplı pozitif yüklü bir çekirdek "gibi" olduğu cevabını elde ederiz. Bunların hepsi atomun ne "olduğunun" tablosunu çizmek için gündelik hayattan taşıdığımız resimlerdir. Bir model yani bir resim oluştururuz; ama çoğunlukla ne yaptığımızı unutuveririz ve bu resimle gerçekliği karıştırırız. O zaman bir modelin bütün şartlarda uygulanabilir olmadığı ortaya çıkarsa, Nick Herbert gibi saygın bir fizikçi bile çıkıp bunu "bir yalan" olarak adlandırma tuzağına düşebilir.

Fizikçilerin kuantum dünyasının modellerini kurma biçimleri gündelik tecrübelere dayanır. Söyleyebileceğimiz tek şey atomların ve atomaltı parçacıkların önceden bildiğimiz bir şey "gibi" olduklarıdır. Hayatında hiç bilardo topu görmemiş birine atomları bilardo topu gibi diye tarif etmenin ya da güneş siteminin nasıl işlediğini bilmeyen birine elektron yörüngelerini gezegen yörüngeleri gibi açıklamanın hiç yararı yoktur.

Analojiler ve modeller tamamen döngüsel de olabilir, mesela bir kristal kafes içinde atomların birbirleriyle etkileşimlerini açıklamaya çalıştığımızda olduğu gibi. Böyle bir kristalde atomlar elektromanyetik kuvvetlerle geometrik bir dizi içerisinde yerlerinde tutulurlar. Atomlardan biri yerinden edilecek olursa, komşu atomları da içeren elektromanyetik etkileşimlerle tekrar yerine itilip çekilir. Bütün atomların yanı başlarındaki komşu atomlara küçük yaylarla bağlandığını hayal etmek faydalı bir analoji olabilir. Atomlardan biri konumunu değiştirirse elektromanyetik kuvvetler sanal yaylar gibi davranır; bir yandaki yaylar gerilip atomu tekrar yerine çekerken öteki taraftaki yaylar sıkışır ve böylece atomu tekrar yerine iter. Elektromanyetik kuvvetin bu şartlar altında bir yay gibi çalıştığını gösteren iyi bir modele rastladık galiba.

Peki yay nedir? En yaygın gündelik çeşidiyle yay sarmal ya da burmalı şekle sokulmuş bir metal parçasıdır. Spiral biçimindeyken gerçekten de kurmalı bir mekanizmanın (fizikçilerin gerçeklik modelinin temel örneği) bir bileşeni olabilir, ki bu da analojiyi daha cazip hale getirir. Biz yayı ittiğimizde o da geri iter; çektiğimizde o da geri çeker. Ama neden? Çünkü elektromanyetik kuvvetle bir ara-

da tutulan atomlardan meydana gelmiştir! Bir yayı çektiğimizde ya da ittiğimizde hissettiğimiz kuvvetler elektromanyetik kuvvetlerdir. Dolayısıyla, bir kristaldeki atomların arasındaki kuvvetler küçük yay gibidirler dediğimizde, elektromanyetik kuvvetler elektromanyetik kuvvetler gibidir demiş oluruz.

Atomlar o kadar bildik kavramlar ki, bu örnekte de görüldüğü gibi onlar söz konusu olduğunda bu modelleme sürecini iş başında görmek bazen zordur. Fizikçilerin atomaltı dünyasının standart modelini nasıl inşa ettiklerine baktığımızda durum çok daha açık görülür: Burada çoğunlukla sadece gündelik hayattan türettikleri analojileri kullanmayıp gerçekliğe ilişkin gündelik algımızdan yola çıkarak ikinci elden türettikleri analojileri kullanırlar. Çekirdeğin (atomu basitçe tarif etmek açısından pozitif yüklü bir bilardo topu gibi görülebilir) içinde, bir anlamda elektron "gibi" parçacıklar ve elektromanyetizma gibi işleyen kuvvetler buluruz. Fakat elektronlar ve elektromanyetizmanın kendileri gündelik hayattaki şeyler "gibi" tarif edilir – bilardo topu ya da bir gölcükteki dalgalar, vb. Gerçeklik biz ne istersek odur – modeller gözlemleri açıklayabildiği sürece iyi modellerdir. Fakat elektronların ve protonların zeki bilim insanları çıksın da onları "keşfetsin" diye atomların içinde uzanıp keşfedilmeyi bekledikleri gerçekten doğru mu? Yoksa daha ziyade, kuantum seviyesindeki gerçekliğin temelde algılanamayan yanları insanlara kolaylık olsun diye kutulara konup "proton" ve "kuark" gibi adlarla mı etiketleniyor?

Kuarkları İnşa Etmek

Bu sorunun cevabını Edinburgh Üniversitesi'nden Andrew Pickering müthiş kitabı *Constructing Quarks*'ta (Kuarkları İnşa Etmek) veriyor. Kitabın Önsöz'ünde şöyle söylüyor: "Burada savunulan görüş kuarkların gerçekliğinin parçacık fizikçilerinin uygulamalarının sonucu olduğudur, tersi değil." Kitaba adını veren budur; ben de onun argümanlarının özetini vermek için bu kısmın başlığını kitaptan aldım.

Çoğu fizikçinin onayladığı standart gerçeklik modeli gündelik hayattaki dünyayı esas itibariyle dört tür parçacık ve dört tür kuvvetten meydana gelmiş olarak görür. Genel manzara biraz karma-

şıktır çünkü parçacıklar (gerçi kuvvetler değil) iki kere çoğalıp birbirine çok yakın özelliklere ama farklı kütlelere sahip üç "kuşak" meydana getirirler. Fakat sıradan atomlar söz konusuyken dört "birinci-kuşak" parçacık her şeyi açıklamaya yeter. Elektronun kendisi bu "temel" parçacıklardan biridir ve elektronla bağlantılı olarak nötrino denilen bir parçacık vardır; birlikte "leptonlar"ı oluştururlar. Fakat, protonlar ve nötronlar, yani çekirdeğin "içindeki" parçacıklar, gerçekten temel parçacıklar olarak düşünülmez. Onlar kuarklardan meydana gelmiş olarak görülürler. Kuarkların ise temel olduğu düşünülür ve ilk kuşakta (iki birinci-kuşak leptonun muadilleri) iki tür halinde ortaya çıkarlar, "yukarı" ve "aşağı". Bu isimlerin hiçbir önemi yoktur; fizikçilerin kullandığı etiketlerden ibarettirler; bu iki kuark mesela "Alice" ve "Bob" diye de pekâlâ adlandırılabilirdi.

Standart modele göre bir proton iki yukarı kuark ile bir aşağı kuarktan meydana gelir ve dört temel kuvvetten biri tarafından bir arada tutulur. Nötron ise iki aşağı kuark ile bir yukarı kuarktan oluşur ve onlar da benzer şekilde bir arada tutulur. Yukarı kuarkların her biri (başka özelliklerinin yanı sıra) bir elektronun elektrik yükünün üçte ikisine eşit bir pozitif yük, her bir aşağı kuark da elektronun üstündeki yükün üçte biri büyüklüğünde negatif bir yük taşıdığından, nötronun toplam yükü olmayıp ($2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$) elektriksel olarak nötrken, proton bir birimlik pozitif bir yüke ($2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$) sahiptir.

Kuarkları bir arada tutup proton ve nötronu oluşturan ve protonlarla nötronları bir arada tutup çekirdekleri oluşturan güçlü kuvvetler gibi, bir de radyoaktiflikten sorumlu zayıf bir kuvvet vardır (ki mantıklı bir şekilde "zayıf kuvvet" diye bilinir). Öteki iki temel kuvvet kütle çekimi ve elektromanyetizmadır. Kuarklar elektronlar "gibi"dir, güçlü ve zayıf kuvvetler elektromanyetizma "gibi"dir ve bozon adı verilen, fotonlar "gibi" olan parçacıkların alışverişi ile hareket ederler. Pek çok bakımdan basit ve cazip bir tablodur bu, tahmin etme açısından da deneysel testlerle teyit edilmiş bir verimliliğe sahiptir. Newton bunu kesinlikle onaylardı. Fakat fizikçiler atomaltı dünyasının bu modelini nasıl kurdular?

Pickering'in vurguladığı noktalardan biri hiçbir kuramın mükemmel olmadığıdır. Aslında ilke olarak her biri belli bir grup de-

neysel olguyu açıklayacak pek çok kuram oluşturulabilir. Fizikçilerin iyi kuramları kötü kuramlardan ayırma yollarından biri en az varsayımla en çok olguyu açıklayanları seçmektir – fakat Dördüncü Bölüm'de gördüğümüz gibi yine de açıklamalar arasında bir tercih yapmak durumunda kalabilirsiniz. Bazı kuramlara ötekilerden daha az makul gözüyle bakılır ve bu şekilde elenirler. Fakat makullükten bahsetmek bir yargıyı ima eder – ve kuantum yorumları örneği bir kere daha bilimsel yargıların bile nasıl kişisel ve yanlı olabildiğini gösterir. En önemlisi de, bilim tarihi boyunca hiçbir tek kuram bütün olguları açıklayamamıştır. Pek çok fizikçi böyle bir her-şeyin-kuramı'nı (HŞK) aradıklarını iddia ederler; fakat eğer tarihten ders alınacak olursa, böyle bir arayış sonuçta başarısız olacaktır. Kuramla deneyler arasında daima anlaşmazlık alanları vardır ve burada bir kere daha, uyuşmazlardan hangilerine tolerans gösterilebileceğine ve hangilerinin belli bir kuramın düşüşünü ilan ettiğine karar vermedeki öznel tercih unsurunu görürüz.

Zira deneyle kuram arasında, deneyin kendisinin yanılgıya açık olmasından dolayı bir uyuşmazlık çıkması gayet mümkündür. Bir deneyin sonucunun bilim insanları tarafından yorumlanma biçimi (özellikle de proton içindeki yapının incelenmesi için yapılan deney türlerinde) büyük ölçüde deneyin nasıl işlediğinin kuramsal olarak anlaşılmasına bağlıdır. Kuramdaki bir kusur deneyin kendisindeki (ya da en azından bizim deneyi anlayışımızdaki) bir kusurda kendini gösterebilir. Yine, fizikçilerin ölçtükleri şeyin ne olduğuna karar vermeleri gerekir. Pickering'in belirttiği gibi, parçacık fiziği türünde bir disiplinde bitip tükenmeyen bir arka plan "gürültüsü" sorunu vardır. Deneycilerin gözlemlemeye çalıştıkları etki türünü taklit eden başka olaylar meydana gelmekte ve bunların elenmesi gerekmektedir. Bu tıpkı bir radyonun arka plandan gelen gürültüsünün (yani "parazit"in) kaldırılması ve duymak istediğiniz sinyal için radyo istasyonunun doğru ayarlanması gerekliliği gibi bir şeydir – hatta fizikçiler araştırmaya çalıştıkları özellikten "sinyal" diye söz ederler ve arka plandaki parazite de "gürültü" derler. Her gürültü izini silmek mümkün değildir, dolayısıyla yine gerekli amaçlar için deneyin "yeterince iyi" olduğu hakkında öznel bir yargıda bulunmak gerekir, kalan gürültü de göz ardı edilebilir.

Fakat başarı başarıyı doğurur. Bir kere bir kuramın her şeyi "iyi"

tarif ettiği ortaya çıkarsa (ya da öyle algılanırsa), rakip kuramları kenara iter ve onlara artık kimse bakmaz. Işık kuramlarının başına da bu gelmiştir. Newton'dan sonra parçacık kuramı bir yüzyıl hüküm sürmüş; Young ve Fresnel'in, ardından da Maxwell'in çalışmalarından sonraysa dalga kuramı parçacık kuramını kenara itmiştir. Ne var ki bugün *iki* kuramı da iyi birer model olarak kabul ediyoruz. Kuark kuramı ışığın dalga-parçacık kuramı kadar gelişmiş değildir. "Kuark ve benzerlerini gerçek varlıklar olarak yorumlayarak," diyor Pickering, "kuark modellerinin seçimi ... sorunsuz olarak gösteriliyor; kuarklar gerçekten dünyanın temel yapı taşlarıysa, alternatif kuramları araştırmayı kim ister ki?" – alternatif kuramlar aynı zamanda bütün deneysel sonuçları açıklayabilse bile, ki bu da pekâlâ mümkün.[79] Pek çok fizikçi standart modelin sadece bir *model* olduğunu unutma tehlikesiyle karşı karşıya. Protonlar üç kuark *içeriyormuş gibi* davranırlar; ama bu, kuarkların "gerçekten var olduğunu" "ispat etmez".

William Poundstone 1988'de yayımlanan *Labyrinths of Reason* (Aklın Labirentleri) adlı kitabında şöyle söylüyor:

> Bilim insanları kafada canlandırılamayan terimlere karşı dikkatli olmalıdır. Kuarklar protonların, nötronların ve başka atomaltı parçacıkların derinliklerinde bulunan farazi varlıklardır, deniyor. Kuarklar gerçeklere terstir: Tek başına bir kuark asla gözlemlenmediği gibi, (pek çok kuram dahilinde) tek başına bir kuark imkânsızdır. Kuarklar protonun parçalanması halinde *oluşturacağı* şeylerdir, tabii *parçalanabilirse*, ki *parçalanamaz* ... acaba [kuarkların varsayılan özellikleri] henüz anlamadığımız basit bir gerçekliğin yapay karmaşası olabilir mi diye düşünüyor insan. Muhtemelen bir gün birisi şeylerin gerçekten nasıl olduklarını bulacak ve şu anki fiziğin bu gerçekliği tarif etmenin zorlama bir yolu olduğunu fark edeceğiz. ... Cevap göklerde değil, kafalarımızda.

Fakat Poundstone fiziğin ne olduğu konusunu anlamada daha yarı yolda. Protonların, nötronların ve başka atomaltı parçacıkların da aynı zamanda kafalarımızdan gerçekliğe modellerimizle yansıttığımız farazi varlıklar olduğunu göz ardı ediyor. Evet, şimdi geleneksel olarak kuark modeli çerçevesinde açıklanan fiziksel fenomenler seviyesinde olup bitenlerin daha basit bir modeli olabilir; fakat bu, şeylerin gerçekten nasıl olduğunu göstermez, gerçekliğin

79. Pickering, *Constructing Quarks*, s. 7.

başka bir modelidir, tıpkı Maxwell dalga denklemlerinin ve Einstein'ın fotonlarının ikisinin de ışık fenomeniyle temsil edilen gerçekliğin iyi modelleri olması gibi. Tıpkı atomun hem bilardo topu modelinin hem de "gezegen" modelinin hangi problemi çözmeye çalıştığınıza bağlı olarak iyi birer model olması gibi.

Söylediğim gibi, fiziğin tamamı kendi duyularımızla yoklayamadığımız alanlarda neler olup bittiğini açıklamak için analoji ve model oluşturma sürecine dayalıdır. 1960'lar ve 70'lerde parçacık dünyasının standart modelini geliştirmede kaydedilen büyük aşama iki kilit analojiden çıkar. Bir tanesi proton ve nötronlardan oluşan çekirdek modelini esas alıp kuarklardan oluşan proton ve nötron modelini tasarlamıştır. Diğeri de elektromanyetik kuvveti foton alışverişi olarak açıklayıp fotonvari parçacıkların alışverişinden kaynaklanan bir kuark-içi kuvvet tasarlamıştır. Kuantum elektrodinamiğiyle (KED) kurulan analoji o kadar hassas, o kadar ölçülüp biçilmiştir ki bu güçlü (ya da "renkli") etkileşimin standart kuramına kuantum kromodinamiği, yani KKD adı verilmiştir – "kromo" çünkü burada yer alan bazı parçacıklara renk adları takılmıştır, "aşağı" ve "yukarı" kuarklarda olduğu gibi keyfi bir adlandırmadır bu, yoksa gündelik hayattaki anlamıyla parçacıkların "gerçekten" renkli olmasından değildir.

Fakat kuark kuramı bir çırpıda tam tekmil sahneye fırlayıp bütün muhalefeti bir kenara itmedi. Fizikçilerin yanına neredeyse onlar hiç istemeden yavaş yavaş sokuldu. İki kuramcı 1960'ların başlarında yaklaşık aynı zamanda birbirinden bağımsız olarak bu fikirle çıkageldi; fakat ikisi de bu yeni kuram için ikna turlarına çıkmadı. Kuark kuramını önerenlerden biri (1929 New York City doğumlu) Amerikalı fizikçi Murray Gell-Mann'dı. "Kuark" adını Joyce'un *Finnegans Wake* (Finnegan'ın Uyanışı) adlı romanındaki bir dizeden alan da odur. Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'nde çalışıyordu ve o civarda bilinen en büyük kuramcılardan biri olarak zaten isim yapmıştı. Fizikçilerin bildiği parçacıkları özelliklerine göre gruplandırma ve keşfedilecek parçacıkların özellikleri hakkında tahminlerde bulunma konusunda başarılı teşebbüslerde bulunmuştu. Tıpkı Dmitri Mendeleev'in 19. yüzyılda kimyasal elementleri periyodik cetvelde gruplandırıp keşfedilmeyi bekleyen elementlerin özelliklerini tahmin etmesi gibi – işte analojinin gücü ve bilimin ge-

leneksel doğası hakkında bir örnek daha.

Bu örüntü arama çabası proton ve nötronların pek çok özelliklerinin farklı şekillerde düzenlenmiş temel üçlüklerle (şimdi kuark dediğimiz şeylerle) açıklanabileceğinin fark edilmesini sağladı. Gell-Mann fikrini 1964'te neredeyse utanarak iki sayfalık bir makaleyle *Physics Letters* dergisinde yayımladı. Tereddüdünün –ve pek çok fizikçinin kuark fikrini yıllarca ciddiye almadaki gönülsüzlüğünün– bir sebebi üçlü parçacıkların elektrondaki yükün belli bir kesrinde elektrik yüküne sahip olması gerektiği fikriydi. Oysa elektronun yükü o sıralarda "mümkün olan en küçük" yük birimi olarak kati bir şekilde belirlenmişti. Bugün kimse kuarkların elektrondaki yükün üçte ikisine ya da üçte birine sahip olmasından rahatsızlık duymaz, fakat 1964'te bunun imkânsız olduğunu "herkes biliyordu". Dolayısıyla Gell-Mann makalesini neredeyse kendi önerisini inkâr ederek bitiriyordu. Özü itibariyle söylediğine göre protonların ve nötronların özelliklerini bu kadar net bir şekilde açıklayabilen üçlükler aslında sadece matematik aygıtlarıydı, proton ve nötronların bazı özelliklerini anlamada bir vasıta yani. Sonucu şöyle özetliyordu:[80]

> Kuarkların (sonsuz kütle limitinde olacağı gibi tamamen matematiksel varlıklar değil de) sınırlı kütleden oluşan fiziksel parçacıklar olduğunu varsayarak nasıl davranacakları hakkında spekülasyon yapmak eğlenceli bir şey. ... En yüksek enerjili hızlandırıcılarda -1/3 ya da +2/3 yüklü kararlı kuarkları ve/veya -2/3, +1/3 ya da +4/3 yükünde kararlı dikuarkları aramak gerçek kuarkların var olmadığı konusunda bizi temin etmeye yardımcı olacaktır.

Kuarkları "icat eden" kuramcı bile bunların hayal ürünü olduğu ve gerçekten var olmadıkları konusunda içinin rahatlatılmasını istiyor. Bu aslında ilk bakışta göründüğü kadar tuhaf değil. Gell-Mann'ın kuarkların "keşfi"ne yaklaşımı oldukça matematikseldi ve daha çok konuyu bilene hitap ediyordu; denklemlerin belli özelliklerinin proton ve nötronların *sanki* üçlüklerden oluşuyormuş gibi ele alınmasıyla açıklanabileceğini bulmuştu, fakat meselenin matematik yanından başlamış, bu üçlüklerin fiziksel olarak gerçek parçacıklar olduğu düşüncesiyle yola çıkmamıştı.

80. *Physics Letters* 8 (1964), s. 214.

Kuarkları icat eden öteki kuramcı kendi buluşundan nispeten daha az kuşkuluydu, ama bu fikri yaymanın kariyerinin geleceği açısından pek iyi olmayacağı kanısına varmıştı. George Zweig 1937' de Moskova'da doğmuş, fakat daha sonra ABD'ye geçip 1959'da Michigan Üniversitesi'nde Fen alanında lisans eğitimini tamamlayarak CalTech'te araştırmaya başlamıştı. Yola deneyci olarak koyulmuş, fakat başarısız üç yılın ardından kuram alanına geçip Richard Feynman'ın danışmanlığında doktorası için çalışmaya başlamıştı. Gell-Mann gibi o da proton ve nötron gibi parçacıkların, "aslar" dediği başka parçacıkların üçlü bileşimi gibi ele alınarak açıklanabileceğini fark etmişti. Fakat belki nispeten daha genç ve parçacık fiziği oyununda yeni olduğu (dolayısıyla da gelenek etkisinde daha az kaldığı) için ihtiyatı elden bırakıp bu varlıkları fiziksel olarak gerçek parçacıklar gibi görmeye daha meyilliydi.

Zweig 1963'te CERN'e, Cenevre'deki Avrupa parçacık araştırma merkezine geçti. Tezini orada tamamlayıp keşfini yayımlamak üzere yazdı. "Keşif" makalesi 1964'te yayımlandı; bu makalede Zweig şu sonuca varıyordu: "Soruna son derece ilkel biçimde yaklaşmamızı göz önüne alırsak elde ettiğimiz sonuçlar oldukça mucizevi görünüyor."[81]

Fizik camiasının büyük kısmı hemfikir görünüyordu. Zweig kavrayışı için takdir edilmek şöyle dursun, çatlak olarak nitelendirilmenin eşiğine gelmişti. 1980'de uluslararası bir konferansta şöyle konuştu:

Kuramsal fizik camiasının as modeline tepkisi genel olarak yumuşak değildi. CERN raporunu istediğim formda bastırmak o kadar güçtü ki sonunda uğraşmayı bıraktım. Önde gelen üniversitelerden birinin fizik bölümü beni işe almayı düşünürken onlarınj kıdemli kuramcısı, bütün kuramsal fiziğin en saygın sözcülerinden biri, bir fakülte toplantısında as modelinin bir "şarlatan" işi olduğunu ateşli bir şekilde iddia ederek bu atamaya engel oldu.[82]

Oysa Zweig, Gell-Mann'ın aksine, CERN "prova baskısı" haline gelen 24 sayfalık ilk yazısında üçlükler fikrinin önemini geniş ay-

81. CERN prova baskısı, sayı 8182/TH401.
82. *Baryon '80* , N. Isgur (haz.), Toronto: University of Toronto Press, 1981, s. 439.

rıntılarla, düzgün bir biçimde ortaya koymuştu.

Adaletsizlik bununla da kalmamıştı. Gell-Mann temel parçacıklar ve etkileşimlerine ilişkin keşif ve katkılarından dolayı 1969'da Nobel Fizik Ödülü'nü aldı. Ödülü kuşkusuz hak ediyordu, fakat 1969'a gelindiğinde bile kuark kuramı daha tam tesis edilmemişti ve ödülün gerekçe kısmında bu çalışmadan söz edilmiyordu. Kuark kuramının standart modelin bir parçası olarak kabul edildiği zamana gelindiğinde, Gell-Mann'a pastadan bir dilim daha vermek uygunsuz kaçacaktı. Öte yandan Nobel Heyeti muhtemelen Gell-Mann'ı da içine katmadan Zweig'ı tanıyamayacaklarını hissetmişti. Kuarkların gerçek olabileceğini ilk ileri süren ve içerimlerini ilk kez açık seçik ayrıntılarla anlatarak parçacık fiziğinin standart modeline giden yolu gösteren adamın Nobel Ödülü almamış olması düpedüz anormal bir durum. Ama zaten kimse Nobel ödüllerinin tamamen adilane ve illa ki akılcı gerekçelerle verildiğini iddia etmiyor.

Kuark kuramı ancak parçacık çarpışmalarını (protonlara çarptırılan elektronlar ve birbirine çarptırılan protonlar) içeren deneyler, protonun içindeki yapıyı göstermeye başladıktan sonra daha ciddiye alınmaya başlamıştır. Fakat ilk bakışta görüldüğü gibi kolay bir şey değildir bu, zira protonlar yapı olarak elektronlardan daha karmaşıktır, ister kuarklardan yapılmış olsun ister olmasın (aşağıdaki iç yapı konusu nötronlar için de geçerlidir, fakat deneyler fiili olarak protonlarla gerçekleştirilmiştir çünkü elektrik yükleri bize manyetik alanlarla çekilebilme ve yüksek enerji seviyelerine çıkarılabilme fırsatını sunar).

KED'de elektrona nasıl bakıldığını bir hatırlayalım: fotonlar, elektron-pozitron çiftleri ve diğerlerinden oluşan bir "sanal" bulutla çevrili bir nokta. Elektronun manyetik momenti bu tür daha da karmaşık ("üst seviye") olasılıkları hesaba katarak muazzam bir hassasiyette hesaplanır karmaşıklık arttıkça hesapta küçük bir düzeltme yapılır. Proton pozitif yük taşıdığından bu tür elektromanyetik etkileşimlerde o da yer alacaktır. Ayrıca elektronun manyetik momentinin hesaplandığı gibi hesaplanabilen bir manyetik momenti vardır. Fakat elektronun aksine proton güçlü kuvveti de "hisseder". Fizikçiler güçlü kuvvetin kuarklar arasındaki etkileşimi içerdiğini daha anlamadan önce bile, çekirdeği bir arada tutmak için protonlarla nötronlar arasında etkili olduğunu biliyorlardı ve bazı

özelliklerini araştırabilmişlerdi. KED'le analoji kurarak protonun başka parçacıklardan oluşan bir bulutla çevrili olması gerektiğini keşfettiler. Bunların içinde proton-karşı-proton çiftleri, nötron-karşı-nötron çiftleri ve mezon denilen kuvvet taşıyıcıları (fotonların güçlü alan dengi) bulunuyordu. Fakat arada çok önemli bir fark vardır. Güçlü alanda bu fazladan etkiler, işler daha karmaşıklaştıkça –hesaplamanın yüksek seviyelerinde– küçülmez. Yüksek seviye etkileri küçük bir düzeltme olmak yerine "gerçek" protonun kendisi kadar önemlidir. Sonuç kuantum alan kuramına göre protonun birbirleriyle etkileşen, güçlü kuvvetin –neyse ki sadece 10^{-13} cm olan– etki menziline uzanan karmaşık bir sanal parçacıklar yumağı olarak düşünülmesi gerektiğidir.

Protonun yapısını araştırmayı amaçlayan deneyler iyi bir elektron kuramına –yani KED'e– dayalıydı. Kuramcılar ancak elektronları anladıklarından emin oldukları ve elektronlar noktavari nesneler olarak ele alınabildiği için, protonların yapılarını ortaya çıkarmak amacıyla elektronların protondan "saçılma" şekilleri yorumlanabildi. Yüksek enerjili (yani hızlı hareket eden) elektronlar hızlandırıcı deneylerinde birbirlerine çarptırıldıklarında çok geniş açılarla yayılma eğilimi gösterirler, sanki bilardo topuna benzer katı nesnelermiş gibi birbirlerine çarpıp sekerler. Fakat, elektronlar protonlardan sektiğinde adeta yumuşak bir nesne onlara sadece hafifçe dokunmuş gibi ancak dar açılarla saparlar. Bu iki tür etkileşim "sert" saçılma ve "yumuşak" saçılma deneyleri olarak bilinir. Bu deneyler protonların gerçekten yaklaşık 10^{-13} cm'lik bir çapları olduğunu göstermiş ve alan kuramcılarına büyük bir destek vermiştir. Fakat deneycilerin sorduğu sorulara doğanın verdiği "cevaplar" yine hangi deneyleri gerçekleştirmek ve neyi ölçmek istediklerine bağlıydı. Filozof Martin Heidegger'in dediği gibi:

> Modern fizik doğayı sorgularken deneysel aygıtlar kullanıyor diye deneysel fizik değildir. Daha ziyade bunun tersi doğrudur. Saf kuram olarak fizik doğanın kendisini tahmin edilebilir kuvvetlerle göstermesini istediğinden, deneyleri sırf doğanın bilimin tarif ettiği düzene uyup uymadığını ya da nasıl uyduğunu sormak amacıyla kurar.[83]

83. Heidegger, *The Question Concerning Technology*, New York: Harper & Row, 1977, s. 21.

1960'ların başlarında iki insanın çok farklı yollar takip ederek kuarkları keşfetmelerine (ya da icat etmelerine) tuhaf bir benzerlikle, 1960'ların sonlarında iki alan kuramcısı saçılma deneylerinin ayrıntılı sonuçlarının açıklamasına eşit biçimde farklı yaklaşımlar getirdi. Bu iki bilimciden biri, Stanford Üniversitesi'ndeki James Bjorken, Gell-Mann'ın yaklaşımının eşdeğerini takip etti, yani deneylere matematiksel açıdan yaklaştı. Bu fenomenlere ilişkin açıklaması matematiksel açıdan işe yaradı, ama Pickering'e göre "bunlar anlaşılmazlık derecesinde ezoterik"ti.[84] Ne var ki, öteki yaklaşım hem kavrayışı güçlü hem de dili anlaşılır olan Richard Feynman'dan geldi.

Feynman'ın yaklaşımının müthiş tarafı, şeyleri (atomları mesela) nelerden meydana geldiğini anlamak için parçalara ayırma geleneğiyle yetişmiş fizikçilere bir anlam ifade etmesiydi. Feynman fikirlerini 1960'ların ortalarında geliştirdi ve 1969'da yayımladı. Kuarklar var mı yok mu diye mesele hakkında önceden hüküm vermeden, yüksek enerjili bir elektron bir protonun içine daldığında ya da yüksek enerjili iki proton kafa kafaya çarpıştığında neler olduğunun *genel* bir açıklamasını verdi.

Feynman'ın çıkış noktası protonun bir parçacık yığını olduğu yönündeki alan-kuramı fikriydi. KED'le kurulan bire bir analojiye göre ortada proton, nötron ve onların karşı-parçacıklarıyla mezonlardan oluşan bir yumak olmalıydı; kuark kuramına göreyse protonlar üç temel kuarktan oluşuyordu, ama *bunların* her biri kendi sanal parçacıklarından oluşan bir bulutla ilintiliydi. Meseleye kasten bilinemezci bir tutumla yaklaşan Feynman protonun bu iç bileşenlerine iki olasılığı da kapsasın diye "parton" adını verdi. Fakat bu karmaşıklığın tek bir çarpışmada çok az bir önemi olduğunu fark etti. Bir elektron protona ateşlenince tek bir partonla bir foton alışverişinde bulunabilir. Parton da bunun sonucunda elektron saparken geriye çekilir fakat elektronun proton üzerindeki etkisi bundan ibarettir (protonun elektron üzerindeki etkisi de öyle). İki proton kafa kafaya çarpışsa bile gerçekte meydana gelen şey iki protonda-

84. Pickering, *Constructing Quarks*, s. 132. Bu konuda Pickering'in görüşünü öğrendiğime memnun oldum, zira bunları hiç anlayamıyorum ve gerçekten işe yaradıklarını matematikçi arkadaşlardan biliyorum sadece.

ki partonların tek tek bir dizi noktavari sert dağılma olayında birbiriyle etkileşime girmesidir. Bjorken'in hesaplamaları (ilim bilim erbabına) gösterdi ki belli bir matematiksel çerçeve protonların saçılma şeklini açıklayabilirdi; ardından Bjorken, neredeyse aklına sonradan gelmiş gibi, bu matematiksel çerçeveye varmanın bir yolunun protonların noktavari parçacıklar içermesi olduğunu söyledi. Feynman'a göreyse eğer protonlar noktavari parçacıklar içeriyorsa saçılma gözlemlerini açıklayan matematiksel bir tarife varılabilirdi.

Pickering Feynman'ın yaklaşımının parsayı toplamasının ve pek çok kuramcıyı tatmin edecek biçimde kuarkların "gerçekliği"ni tesis eden başka deneylere yol açmasının sebebini uzun süreli ve iyi anlaşılmış bir geleneği takip etmesine bağlıyor. Kuramcıların elinde 20. yüzyılın başlarındaki deneyler biçiminde, atomun yapısını araştırmış hazır bekleyen klasik bir analoji vardı. Öncü parçacık fizikçisi Ernest Rutherford atomları alfa parçacıkları denilen (helyum çekirdekleri olarak da bilinir) şeylerle bombardımana tutmuş ve bazı alfa parçacıklarının geniş açılarla saçıldığını keşfetmişti. Bu da atomun merkezinde (çekirdeğinde) sert ve bilardo topu benzeri bir şey olduğunu gösteriyordu. 1960'lardaki deneyler normalde "yumuşak" olan protonların içinden elektronların şaşırtıcı derecede geniş açılarla saçıldığını göstermişti ve Feynman'ın modeli bunu protonun içindeki sert, bilardo topu benzeri bir şey aracılığıyla açıklıyordu.

Standart modelin tesis edilmesi yıllar sürdü, fakat fizikçiler bu paralelde düşünmeye koyulunca bütün süreçte bir kaçınılmazlık havası oluştu. Kurulan iki büyük analojiyle –atomun çekirdek modeli ve ışığın KED kuramı– proton ve nötronların kuark modelleri ve güçlü etkileşimin KKD kuramı karşı konulmaz oldu. "Analoji pek çok seçenekten biri değildi," diyordu Pickering; "ortaya çıkan her şeyin temeliydi. Analoji olmadan asla yeni fizik olmazdı."[85]

Aynı şey kuantum mekaniğinin kendisi için de geçerlidir. Hatta, kuantum fiziğini analoji dışında bir şey olarak görmek zordur – dalga-parçacık ikiliği bunun klasik örneğidir. Burada, anlamadığımız bir şeyi aynı kuantum varlığına birbiriyle zıt *iki* analoji uygulayarak "açıklamaya" çalışırız.

85. Pickering, *Constructing Quarks*, s. 407.

Ama Pickering merak uyandırıcı ve belki de rahatsız edici bir soru daha soruyor. Parçacık fiziğinin standart modeline giden yol kaçınılmaz mıydı? Dünyanın işleyişi hakkındaki gerçek (ya da tek) hakikat bu mu? Bizi standart modele götüren kuramların hiçbiri kusursuz değildi, diyor Pickering, parçacık fizikçileri de sürekli hangi kuramları terk edeceklerine ve deneyle daha uyumlu olmak üzere hangilerini geliştirmek için seçeceklerine karar vermek zorundaydı. Geliştirmek üzere seçtikleri kuramlar aynı zamanda hangi deneylerin gerçekleştirileceği seçimini de etkilemiş ve bu etkileşimli kararlar zinciri yeni fiziği yaratmıştır. Yeni fizik, içinde yaratıldığı kültürün bir ürünüdür.

Bilim felsefecisi Thomas Kuhn bu tür bir savı mantıki sonuçlarına götürdü. Eğer bilimsel bilgi gerçekten kültürün bir ürünüyse, diyordu Kuhn, o halde farklı dünyalarda (belki de kelimenin tam anlamıyla farklı gezegenlerde; ya da aynı gezegende farklı zamanlarda) var olan bilim camiaları farklı doğa olaylarını önemli addedecek ve bu olayları farklı kuramsal yollarla açıklayacaktır (farklı analojiler kullanarak). Farklı bilim camialarından –farklı dünyalardan– gelen kuramlar birbirlerine karşı test edilemez ve felsefe jargonuyla "kıyaslanamaz"dır.

Bu pek çok fizikçinin kendi çalışmaları hakkında düşündüklerine ters bir şeydir. Başka bir gezegenden bir bilim camiasıyla temas kursak ve dil sorununun halledildiğini varsaysak, o uzaylı uygarlığın bizim atomun doğası, proton ve nötronların varlığı ve elektromanyetik kuvvetin çalışma biçimi hakkındaki görüşlerimizi paylaşacaklarını hayal ederler. Hatta, birden fazla bilimkurgu öykü, bilimin (resmen) evrensel dil olduğunu ve uzaylı bir uygarlıkla ortak nokta bulmak için iletişim kurma yolunun, mesela elementlerin kimyasal özelliklerini ya da kuarkların doğasını tarif etmekten geçtiğini ileri sürer. Uzaylıların atomlar hakkındaki fikirleri tamamen farklı çıkarsa ya da atom kavramları hiç yoksa ortak nokta bulma çabası daha baştan güme gidecektir.

Bilimin evrensel dil olduğu fikri genellikle en güçlü biçimde matematikle ifade edilir. Pek çok bilim insanı matematiğin evreni açıklamada görünüşe göre sihirli bir araç gibi "işlediği" konusunda yorumlarda bulunmuştur; Albert Einstein bir keresinde şöyle demişti: "Evrenin en anlaşılmaz yanı anlaşılır olmasıdır." Sıradan bir

insanın bir ömürden kısa bir süre içinde evren hakkında, onu bu şekilde "anlamak" için yeterince bilgiye sahip olabilmesi konusunda bazen kafa yormuşumdur. Ama şimdi düşünüyorum da bunun hiç de gizemli bir tarafı yok. Beni bulmacaya teleskobun yanlış tarafından baktığıma ikna eden Pickering, İngiltere Kilisesi'nde rahip olan Britanyalı kuantum kuramcısı John Polkinghorne'dan şu alıntıyı yapıyor: "Dünyayı anlayabilmemiz ve matematiğin fizik bilimi için kusursuz bir dil sağlaması, yani kısaca bilimin mümkün olması, dünyaya ilişkin yabana atılmayacak bir gerçek."[86]

Fakat Pickering böyle savların yanlış olduğunu söylüyor:

> Bilim insanlarının dünyaya ilişkin kendilerince makul açıklamalar üretmeleri *sorunlu bir durum değil*: Kültürel kaynaklarını dikkate alınca, ancak müthiş bir yetersizlik [fizik] camiasının üyelerini tarihlerinin herhangi bir noktasında gerçekliğin anlaşılır bir versiyonunu üretmekten alıkoyabilirdi. Ve gelişmiş matematik teknikleri üzerine aldıkları kapsamlı eğitimi hesaba katınca, parçacık fizikçilerinin gerçeklik anlatılarında matematiğin neden o kadar baskın olduğunu açıklamak, etnik grupların ana dillerine duydukları sevgiyi açıklamaktan daha zor değil.

Başka bir deyişle matematiğin evreni tarif etmede iyi bir dil olması "gizemi", İngilizcenin piyes yazmak için iyi bir dil olduğunun keşfi kadar önemli. Eğer dünya görüşleri Pickering'in ve Kuhn'un savundukları gibi gerçekten kültürel ürünlerse, o zaman kuantum gerçekliğinin farklı yorumlarının olmasında şaşılacak bir şey yok. Fakat bu temayı geliştirmeden önce bilimin başka bir alanından birkaç örnek vermem, evreni matematiği kullanarak tarif edebilmemizin şaşılacak bir şey olmadığına ve gerçekliğin bu matematiksel tarifini nasıl yorumladığımızın büyük ölçüde (belki de tamamen) bir seçim meselesi olduğuna sizi ikna etmemi kolaylaştırabilir.

Einstein'ı Yerli Yerine Koymak

Matematiğin dünyayı tarif etmedeki gücüne benim de sık sık kullandığım bir örnek, 19. yüzyıl matematikçilerine gerçek evrenle alakası olmayan soyut geometrik fikirler gibi görünen şeyin Albert

86. Pickering'den yaptığım bu ve sonraki alıntı, *Constructing Quarks*, s. 413.

Einstein'ın genel görelilik kuramının temel taşını sağlamış olmasıdır. Hikâyenin eğlenceli taraflarından biri Einstein'ın kendisinin bunu önce fark etmeyip ancak 19. yüzyıl yaklaşımına bir nevi zorla dikkatinin çekilmesi sonucu kendi dünya modelini geliştirmek için matematiği kullanabilmiş olmasıdır.

Einstein'ın genel görelilik kuramının kilit özelliği bükülmüş uzay-zaman fikridir. Ama Einstein uzay-zaman geometrisi fikrinin ne mucididir, ne de uzayın bükey olduğunu fark eden ilk kişidir. Einstein'ın iki görelilik kuramını anlamanın kolay yolu geometriden geçer. Uzay ve zaman İkinci Bölüm'de gördüğümüz gibi dörtboyutlu bir varlık olan uzay-zamanın bir parçasıdır. Sabit hızdaki tekdüze hareketi ele alan özel görelilik kuramı düz, dört boyutlu bir yüzeyin geometrisiyle açıklanabilir. Mesela zaman genişlemesi ve hareket eden nesnelerin küçülmesi gibi tuhaf fenomenleri tarif eden özel görelilik kuramı denklemleri özü itibariyle Pisagor teoreminin bildik denklemidir. Ondan farklı olarak dört boyuta çıkarılmış olup zaman boyutunun negatif yönde ölçülmesi gibi minik bir inceliğe de sahiptir.

Bunu bir kere kavradınız mı Einstein'ın kütle çekimi ve ivmeye dayalı bir kuram olan genel görelilik kuramını anlamak kolaydır. Evrende kütle yığınlarının (mesela güneşin) sebep olduğu kuvvetler olarak düşünmeye alışık olduğumuz şey uzay-zamanın dokusundaki bükülmelerdir. Mesela güneş uzay-zamanın geometrisinde bir çukur açar ve dünyanın güneş etrafındaki yörüngesi, kıvrılmış uzay-zamandaki mümkün olan en kısa yolu (jeodezik) takip etmeye çalışmasının sonucudur.

Tabii bu yörüngenin ayrıntılarını bulmak istiyorsanız birkaç denkleme ihtiyacınız var. Ama bunu matematikçilere bırakalım. Fizik kısmı cazip bir şekilde yalın ve kolay anlaşılırdır ve bu yalınlık genellikle Einstein'ın "emsalsiz deha"sına örnek olarak gösterilir.

Ne var ki bu yalınlık ve kolay anlaşılırlık Einstein'dan gelmemiştir.

İlk olarak özel görelilik kuramını ele alalım. Einstein bunu 1905'te dünyaya duyurduğunda denklemlere dayalı bir matematik kuramıydı. O sırada büyük bir yankı uyandırmadı ve genel olarak bilim camiasının oturup bunu fark etmesi birkaç yıl aldı. Bu da aslında Hermann Minkowski'nin 1908'de Cologne'da verdiği bir konferans-

tan sonra oldu. Özel görelilik kuramının fikirlerini uzay-zaman geometrisi cinsinden ilk gözler önüne seren işte bu konferanstır ve konferans metni 1909'da Minkowski'nin ölümünden hemen sonra yayımlanmıştır. Açılış sözleri yeni içgörünün gücünü ortaya koyuyor:

> Sizlere takdim etmek istediğim uzay ve zaman görüşleri deneysel fiziğin topraklarında filiz vermiştir, kuvvetini de oradan alır. Radikal görüşlerdir bunlar. Bundan böyle uzayın da zamanın da kendi başına ancak bir gölge kadar hükmü vardır, ancak ikisinin bir tür birleşimi bağımsız bir gerçekliği muhafaza edecektir.[87]

Minkowski'nin özel görelilik kuramını muazzam biçimde basitleştirmesi büyük yankı uyandırmıştı. Einstein'ın Temmuz 1909'da Cenevre Üniversitesi'nden fahri doktora unvanını alması ve bir yıl sonrasında Fizikte ilk Nobel Ödülü'ne aday gösterilmesi tesadüf değildi.

Bütün bunlarda hoş bir ironi var. Minkowski aslında 19. yüzyılın sonlarında Einstein'ın Zürih politeknikteki hocalarından biriydi. Einstein özel görelilik kuramıyla çıkagelmeden birkaç yıl önce Minkowski onu "matematiğe hiç aldırmayan tembel köftehor" diye nitelemişti. Tembel köftehorun kendisi de önceleri göreliliğin geometrileştirilmesinden etkilenmiş değildi, bunun kadrini bilmesi biraz zaman aldı. Politeknikte matematiğe hiç aldırmadığından 19. yüzyılın matematikteki en önemli gelişmelerinden birinden tamamen habersizdi. *Bükülmüş* uzay-zaman kavramına doğru ilerlemeye arkadaşı ve meslektaşı Marcel Grossman tarafından dürtüldükten sonra başladı.

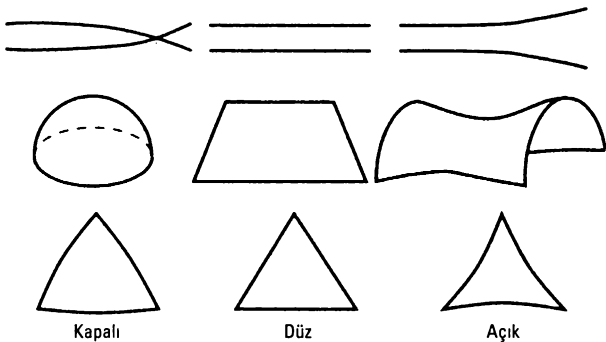
Einstein'ın Grossman'dan ilk yardım alışı değildi bu. Grossman Einstein'ın politeknikteki çağdaşıydı, fakat çok daha gayretli bir öğrenciydi. (Einstein'ın aksine) dersleri takip etmesinin yanı sıra ayrıntılı not da tutardı. Einstein'ın 1900'de politeknikteki final sınavlarından çaresiz bir son dakika çalışmasıyla kıl payı geçmesini sağlayan bu notlardı.

Grossman'ın bilip Einstein'ın Grossman 1912'de ona söyleyene kadar bilmediği şey geometride (hatta çok boyutlu geometride) şu bizim yaşlı Öklid'in "düz" geometrisinden daha fazla şey olduğuydu.

87. Aktaran Abraham Pais, *Subtle is the Lord* (Oxford: Oxford University Press, 1982), s. 152. Diğer alıntılar da aynı kaynaktan.

Öklid geometrisi okulda karşılaştığımız türdendir: Bir üçgenin iç açılarının toplamı 180°'dir, paralel doğrular asla birleşmez, vs. Öklid'in ötesine geçen ve yaptığı şeyin önemine vâkıf ilk kişi 1777' de doğmuş ve 1799'a gelindiğinde bütün büyük matematik keşiflerini tamamlamış olan Alman Karl Gauss'tu. Fakat fikirlerinin pek çoğunu yayımlama zahmetine girmediği için, Öklid-dışı geometri Rus Nikolay Ivanoviç Lobaçevski –1829'da böyle bir geometrinin tarifini yayımlayan ilk kişi– ve Macar János Bolyai tarafından birbirinden bağımsız olarak keşfedilmiştir.

Bunların hepsi temelde aynı tür "yeni" geometriyi ele alır. Bu geometri "hiperbolik" diye bilinen, semere ya da iki dağ arasına benzeyen bir şekle sahip olan yüzeye uygulanır. Böyle bükülmüş bir yüzeyde bir üçgenin iç açıları toplamı daima 180°'den *azdır*. Burada düz bir doğru çizip onun dışında bir nokta işaretleyerek bu noktadan geçen başka pek çok doğru da çizebilirsiniz; bunların hiç-



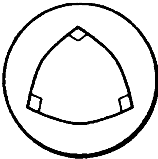
20 Uzay üç temel geometriden birine uyabilir. Uzay üç boyutlu olsa da bunları iki boyutta gösterebiliriz.
Uzay *pozitif olarak* bükülmüşse evren kapalı demektir. *Pozitif olarak* bükülmüş uzayda (solda), birbirine paralel başlayan doğrular (terimin her zamanki anlamıyla) birbirini kesebilir ve bir üçgenin iç açıları toplamı 180 dereceyi geçer.
Uzay *negatif olarak* bükülmüşse evren açık demektir. *Negatif olarak* bükülmüş uzayda (sağda), birbirine paralel başlayan doğrular birbirinden uzaklaşabilir ve bir üçgenin iç açıları toplamı 180 dereceden az olur.
Uzay düzse, paralel doğrular ve üçgenler okulda öğrendiğimiz geometri kurallarına ("Öklid geometrisi") uyarlar. Düz uzay (ortadaki resim) *pozitif ve negatif* bükülmenin birbirinden ayrıldığı yerdeki özel bir durumdur. Bizim evrenimiz fark edilmeyecek biçimde düze yakındır.

biri ilk doğruyu kesmez ve bu nedenle de ona paraleldir.

Fakat Öklid-dışı geometri kavramını 1850'lerde kapsamlı bir temele oturtan, Gauss'un öğrencisi Bernhard Riemann oldu. Riemann aynı temanın bir başka çeşitlemesinin, yani bir kürenin kapalı yüzeyine de (dünyanın yüzeyi de dahil) uygulanabilen geometrinin farkına vardı. Küresel geometride bir üçgenin iç açılarının toplamı daima 180°'den *fazladır* ve bütün "boylam çizgileri" ekvatordan dik açılarla geçse ve bu yüzden de birbirilerine paralel olmak zorunda olsa da, kutuplarda kesişirler.

Riemann 10 Haziran 1854'te "geometrinin temellerinde yatan hipotezler üzerine" başlıklı bir konferans verdi. Metni Riemann'ın ölümünden bir sene sonraya, 1867'ye kadar basılmayan bu konferansta Riemann envai çeşit konu ele aldı, bunların içinde uzayın bükümüyle ne kastedildiğinin pratik bir tanımı ve nasıl ölçülebileceği, küresel geometrinin ilk tanımı (hatta içinde yaşadığımız uzayın hafiften bükülmüş olduğu ve bütün evrenin bir kürenin yüzeyi gibi kapalı –ama iki boyutlu değil, üç boyutlu– olduğu spekülasyonu da dahil) ve en önemlisi cebir yardımıyla geometrinin boyutlarının artırılması da vardı.

Riemann 1866'da 39 yaşında tüberkülozdan öldü. Fakat Einstein evrenimizdeki uzayın bükülmüş olma ihtimalini düşünen ikinci kişi bile değildi. Tarihsel sıralama bakımından Riemann'ın çalışması ile Einstein'ın doğumu arasındaki açıklık İngiliz matematikçi William Clifford'ın hayatı ve eserleriyle güzelce doldurulmuştur. Clifford 1845-1879 yılları arasında yaşamış, Riemann gibi o da tüberkülozdan ölmüştür. Clifford Riemann'ın çalışmasını İngilizceye çevirerek bükey uzay fikrinin ve Öklid-dışı geometrinin ayrıntılarının İngilizce konuşan dünyaya tanıtılmasında önemli bir rol oynamıştır. İçinde yaşadığımız üç boyutlu evrenin, tıpkı bir kürenin iki boyutlu yüzeyinin kapalı ve sonlu olduğu biçimde, ama en az dört boyutun yer aldığı bir geometride kapalı ve sonlu olması ihti-



21 Dünyanın yüzeyi gibi bir küre tipik bir kapalı yüzeydir. Küresel bir yüzey üzerinde bir üçgenin iç açılarının toplamı 270 olabilir – üç dik açı.

malinin farkındaydı. Bu mesela şu demekti: Nasıl ki dünyada bir insan herhangi bir yönde sürekli düz bir doğrultuda yolculuk edince başladığı yere gelirse, kapalı bir evrende de bir insan istediği yönde yolculuğa başlayıp dosdoğru devam edince sonunda baştaki hareket noktasına gelecektir.

Fakat Clifford uzay bükülmesinin, bütün evrenin derece derece bükülerek kendi üstüne kapanması dışında da bir şeyler içerebileceğini fark etti. 1870'te Cambridge Felsefe Cemiyeti'ne bir makale sundu (o sırada Newton'un eski üniversitesi Trinity'de hocaydı). Bu makalede yer yer "uzay bükülmesindeki değişim" olasılığını anlatıp, "uzayın küçük bölümleri aslında [dünyada bulunan] yüzeydeki tepelere benzeyen bir yapıdadır ve ortalama olarak düzdür; yani, sıradan geometri yasaları onlarda geçerli değildir," görüşünü ileri sürdü. Başka bir deyişle, Einstein doğmadan yedi yıl önce Clifford uzayın yapısındaki *yerel* burulmaları düşünüyordu – ne var ki bu burulmaların nasıl meydana gelebileceği ve bunların varlığının gözlemlenebilen sonuçlarının neler olabileceği hakkında fikir ileri sürmeye eli değmemişti, ayrıca genel görelilik kuramı güneşi ve yıldızları sadece uzayda değil uzay-zamanda, tepeler değil çukurlar yaparken resmediyordu.

Clifford 19. yüzyılın ikinci yarısında Öklid-dışı geometriyi incelemiş olan pek çok araştırmacıdan sadece birisiydi – gerçi en iyilerinden biriydi, bunun gerçek evren için ne anlama gelebileceğini çok net kavrayan biri. Bu konudaki kavrayışı özellikle derindi; Einstein doğmadan on bir gün önce ölmemiş olsaydı Einstein'ın yerini almak açısından ne kadar ileri gidebileceğini düşünmek insanın içini gıcıklıyor.

Einstein özel görelilik kuramını geliştirdiğinde çok boyutlu ve bükey uzaylar üzerindeki bütün bu 19. yüzyıl matematik çalışmalarından zinhar habersizdi. Özel görelilik kuramının büyük başarısı Maxwell'in elektromanyetik denklemleriyle tanımlanmış ışığın davranışıyla (özellikle de ışık hızının mutlak bir sabit olmasıyla) mekaniği bağdaştırmasıdır – Newton mekaniğini atıp yerine daha iyi bir şey koyma pahasına olsa bile.

Newton mekaniğiyle Maxwell denklemleri arasındaki çelişki 20. yüzyılın başlarında çok bariz olduğundan özel görelilik kuramının zamanın doğurduğu bir şey olduğu söylenir sık sık. Eğer Eins-

tein 1905'te bu kuramla çıkagelmeseydi bir-iki yıl içinde başkası bulacaktı, denir.

Öte yandan Einstein'ın özel görelilikten genel göreliliğe sıçraması –yeni, Öklid-dışı kütle çekimi kuramı– genellikle zamanın onlarca yıl ötesinden gelen emsalsiz bir deha ürünü gibi görülür, o dönemin fizikçilerinin karşılaştığı sorunlarda hiçbir habercisi olmaksızın sadece Einstein'ın kendisinden çıkan bir kuram gibi.

Doğru olabilir, fakat bu geleneksel bakışın atladığı şey şu ki Einstein'ın özel görelilik kuramından genel görelilik kuramına (on yılı aşkın bir süre içinde) gidiş yolu aslında olabileceğinden ve olması gerektiğinden daha eziyetli ve daha karmaşıktı. Özel görelilik kuramı nasıl ki 19. yüzyıl sonlarının *fiziğinin* doğal bir sonucuysa, genel görelilik kuramı da aslında 19. yüzyıl sonlarının *matematiğinin* doğal sonucudur.

Eğer Einstein tembel köftehorun teki olmayıp politeknikteki matematik derslerine daha çok özen gösterseydi pekâlâ 1905'te özel görelilik kuramının hemen arkasından genel görelilik kuramını da bulurdu. Ve Einstein hiç doğmamış olsaydı 1910-1920 yılları arasında başka biri, muhtemelen Grossman, Riemann ve Clifford'un eserlerinden sıçrayarak kütle çekiminin geometrik kuramıyla çıkagelecekti.

Einstein 19. yüzyıl geometrisini anlamış olsaydı iki görelilik kuramına çok daha çabuk biçim verirdi. Bunların önceki çalışmaların devamı olduğu bariz olurdu; ayrıca belki de, ortada Einstein'ın "emsalsiz bir kavrayış"a sahip olduğuna dair daha az gösterge ve fikirlerinin genel kabul görmüş matematiğe nasıl uyduğuna dair daha net bir görüş olunca genel görelilik kuramı için Nobel Ödülü bile alabilirdi.

Bu, en azından, hikâyeyi (matematiğin gücünü vurgulayarak) anlatmanın bir yolu. Aslında hikâyenin bu versiyonu 1993'ün başlarında *New Scientist*'e yazdığım bir makaleyi yakından takip ediyor. Bu makale sonucunda Kaliforniya'nın Santa Monica şehrindeki RAND'da çalışan bir araştırmacı olan Bruno Augenstein'dan bir mektup aldım. Augenstein'ın bana söyledikleri hikâyeye oldukça başka bir ışık tutuyordu ve Pickering'in bilimin nasıl işlediği konusunda haklı olduğuna ikna olmamı sağladı.

Augenstein şöyle diyordu: "Bir süre ben de Wigner/Dyson eko-

lündendim ('matematiğin fen bilimlerindeki akıl almaz yararı...'), fakat şimdi makalenizde dile getirdiğiniz kavrama güçlü bir işlevsel aksiyom statüsü verilebileceğine ikna oldum. Yani: matematiksel kavramların her versiyonunun başka bir yerde fiziksel bir modeli vardır, dolayısıyla akıllı fizikçinin işinin bir parçası, bilerek ve rutin olarak önceden keşfedilmiş matematik yapılarının fiziksel modellerini aramaktır."

Başka bir deyişle, Pickering'in önerdiği gibi, fizikçiler kendiyle tutarlı herhangi bir hammadde yardımıyla gerçekliğin anlaşılabilir versiyonlarını üretmeye muktedirdir.

Şunu itiraf etmeliyim ki Augenstein'ı durumun bu olabileceğine ikna eden şey sadece makalemin berrak ve derin bir içgörüye sahip oluşu değildi.

Augenstein matematiğin, Banach-Tarski teoremleri (BTT) diye bilinen konusunu ele alan, biraz karanlıkta kalmış bir dalının (kendi deyişiyle "küme kuramının bir nevi gerçeküstü köşesi"nin), bir zamanlar matematikte gerçek dünyayla bağlantısı olmadığı düşünülen bir çalışmanın fizikte daha sonra keşfedilen bir buluşu önceden haber vermesine başka bir örnek sunduğunu görmüştü. Bu durumda o keşif, Gell-Mann ve Zweig'ın özgün kuark kuramıydı.

Ayrıntıya girmeyeceğim; "küme kuramının bir nevi gerçeküstü köşesi"ni anlama konusunda ehil değilim, o yüzden Augenstein'ın sözüne inanmak zorundayım.[88] Fakat temel nokta şu ki Banach ve Tarski'nin çalışması (1924'te basılmıştır) nesnelerin kendilerini teşkil eden bileşenlerine ayrılıp ardından yeniden bir araya getirilerek başka bir şey oluşturmalarını ele alır.[89] Augenstein'ın kendi ağzından: "İstediğiniz sonlu büyüklüğe ve rasgele şekle sahip katı bir A cismini *m* sayıda parçaya bölebilir ve ardından bunları hiç değiştirmeksizin, yine istediğiniz sonlu büyüklüğe ve rasgele şekle sahip katı bir B cismini elde etmek için yeniden bir araya getirebilirsiniz."

Gerçekten de gerçeküstü – fakat pratikte bir işe yaramayacak kadar genel. O yüzden Augenstein bu davranışın katı küreleri ele

88. İsmine rağmen epey saygın bir bilimsel dergi olan *Speculations in Science and Technology*'de fikirlerinin yayımlanmak üzere kabul edilmiş olması bana güven verdi.
89. S. Banach ve Tarski, *Fundamenta Mathematica* 6 (1924), s. 244.

alan özel bir versiyonuyla ilgilendi. Yarıçapı bir birim olan bir katı cisim küresi beş parçaya bölünebilir, öyle ki, bu parçalardan ikisi bir araya getirilerek yarıçapı bir birim olan katı bir küre elde edilebilir, öteki üç parça da yarıçapı bir birim olan ikinci bir katı küre haline getirilebilir. Bunlar bu numarayı gerçekleştirmek için ihtiyacınız olan en az parça sayısıdır, fakat olay böyle devam edebilir – belki sırada ne olduğunu tahmin etmişsinizdir.

Speculations in Science and Technology'de yayımlanan makalesinde Augenstein, bu matematik kümelerinin ve altkümelerinin davranışını yöneten kuralların parçacık fiziğinin standart modeli olan kuantum kromodinamiğindeki (KKD) kuark ve "gluonlar"ın davranışını tarif eden kurallarla şeklen tamamen aynı olduğunu gösterir. KKD ilk BTT makalesinin çıkışından yarım yüzyıl sonra geliştirilmişti; fakat standart modeli geliştiren fizikçiler küme kuramının o gerçeküstü köşesini hiç bilmiyorlardı. Hatırlarsanız bu modeldeki nötronlar ve protonlar üçlü kuarklardan meydana gelmiştir ve protonlarla nötronları bir arada tutan gluonlarsa (KED'deki fotonların dengi) kuark çiftlerinden oluşur.

Metal bir hedefe giren bir protonun hedeften çıkarken her biri orijinal protonla tıpatıp aynı olan bir yığın yeni kopyasını ürettiği o sihirli durum, kürelerin parçalara ayrılıp sonra onlardan küre çiftlerinin yaratıldığı BTT işlemiyle tam olarak tarif edilmektedir. BTT "kuramsal matematiğin en şaşırtıcı sonucu" olarak tanımlanmıştır, Augenstein'ın onayladığı ve sizin de muhtemelen katılacağınız bir görüş.

İlginçtir, Augenstein'ın analojisi tahminlerde de bulunuyor. Protonlar nasıl ki bir zamanlar özelliği olmayan bilardo topları olarak görülüyorduysa ve sonra yüksek enerjili elektronlarla araştırılıp içeride üç kuarkın olduğu "ortaya konduysa" (ve nasıl ki Rutherford'un araştırmaları sonucu atomun içinde çekirdeğin olduğu ortaya çıkmışsa), deneysel fizikçilerin en son planları daha yüksek enerji seviyelerine çıkmanın ve kuarkların "içini" de araştırmanın mümkün olabileceğinin ipuçlarını veriyor – tabii kuarkların içinde bir şey varsa. Başka bir ilginç durum da, Banach-Tarski teoremlerinin Augenstein versiyonundaki beş matematiksel "parça"nın bir karışım olması; parçaların dördü kuarkların içinde çok ayrıntılı bir yapıyı ima ediyor, beşinciyse tek bir noktanın matematiksel tanımı.

Banach-Tarski teoremlerinin parçacık fiziği açısından ne ima ettiğiyle ilgilenen tek kişi Augenstein değildi. 1982'de Roger Jones *Physics as Metaphor* (Metafor Olarak Fizik) adlı kitabında şöyle yazıyordu:

Muon bir elektronun yaptığından fazla bir şey yapmazken ne diye var..? Muon elektrondan kabaca 200 kat daha kütleli ... aralarında sadece tek bir önemli nicelik farkı var – o da kütle.

Başka parçacıklar birkaç önemli ölçümle birbirinden ayrılır, fakat elektronlar ve muonlar bir doğrunun iki parçası gibiler, temel noktalardan aynı biçimde yapılmış ama uzunlukları farklı. Elektron ve muon aynı sayıda noktaya sahip farklı büyüklükteki iki toptur. ... Büyüklüğün kendisi, ölçüm, sayı – bunların hepsi görüntü ve metafordan ibarettir, bazı nihai değişmezlerle karıştırılmamalıdır, putlaştırılmamalıdır.

Fakat üç boyutlu ölçüme yani hacme gelince, hesaba katmamız gereken başka bir şey daha vardır. Bu, herhangi büyüklükteki bir kürenin parçalara ayrılıp yeniden başka bir büyüklükte bir küre haline getirilebileceğini söyleyen hayret verici, paradoksal Banach-Tarski teoremidir ... bir elektron sonlu sayıda aşamalarla bir muona dönüştürülebilir.

Maddenin matematik uzayındaki bir tür soyut dağılım olarak ifade edilme noktasına kadar gelindiği bugün ... bizim aslında konuştuğumuz şey daha organik, birleşmiş, kaotik bir uzay anlayışıdır. Bir şeyden yoksun ya da yetersiz bir uzay değil, daha ziyade bizimkinden farklı bir uzay – başka bir metafor.

Fizikçiler bu fikirleri alıp gerçekliğin kuark-KKD tanımının ötesine gidecek yeni bir "standart model" geliştirecekler mi? Yoksa bunlar bilimin tuhaf tali bir yolu, hiçbir fiziksel önemi olmayan matematiksel bir gariplik olarak solup gidecek mi? Bunu göreceğiz. Augenstein fizikçilerin gerçeklik tanımlarını peri masallarına benzetiyor ve modellerin elde olan malzemeyle neredeyse keyfi olarak kurulabileceği fikrinin ciddiye alınması için fizikçilerin tutumlarında ve alışkanlıklarında önemli bir değişiklik gerekeceğini vurguluyor. Böyle bir tutum değişikliğinin meydana gelmesi uzun zaman alabilir, tabii o da olursa; fakat bu, Pickering'in, fizikçilerin modellerini nasıl buldukları, başka fizikçi-felsefecilerin bu fikirleri modellerin kaynağına bakarak nasıl zaten geliştirmekte oldukları ve fizikçilerin dünyayı nasıl kavradıkları hakkında vardığı sonuçları çok andırıyor. Hatta bazı fizikçiler Pickering ve Augen-

stein'ın işaret ettiği yöne doğru çoktan yola çıkmış olabilirler, yaptıkları şeyin öneminin tam farkına varmadan.

Tarif Edilemeyeni Tarif Etmek

Küme kuramının daha gerçeküstü gölcüklerindeki bulanık sulara ayağımızın ucunu daldırdıktan sonra, filozofların fiziğin ne olduğuna dair görüşlerine tekrar dönmeden önce evrenbilimden sadece bir tane örnek vermek istiyorum.

Kuarkları ve KKD'siyle işlerin küçük ölçekte nasıl yürüdüğünü "açıklayan" parçacık fizikçileri gibi, evrenbilimcilerin de evrenin büyük ölçekte nasıl işlediğinin maddeyi, kütle çekimini ve genel görelilik kuramını içine alan standart bir modeli vardır. Evrenbilimcilerin standart modeli olan Büyük Patlama kuramıyla ilgili büyük sorunlardan biri –belki de *tek* büyük sorun– evrenin doğumundaki tekilliğin (*singularity*) mevcudiyeti. Astronomlar, teleskoplar galaksilerin birbirinden uzaklaştıklarını gösterdiği için evrenin genişlediğini biliyorlar. Einstein'ın genel görelilik kuramı bu genişlemeyi önceden biliyordu, zira kuram galaksilerin arasındaki uzayın geçen zamanla yayılmak zorunda olduğunu söylüyor. Hem kuram hem de gözlemlerden yapılan çıkarsamaya göre evrenin çok zaman önce nasıl bir şey olduğunu bulmak için bu genişlemeyi zamanda geriye sardığınızı hayal ederseniz, zamanda bütün kütlenin ve evrendeki bütün uzay-zamanın tek bir nokta halinde yoğunlaşmış olduğu bir anla, yani tekillikle, karşılaşırsınız.

Tekillik bildiğimiz haliyle fizik kurallarının işlemediği bir yerdir. Denklemleri harfiyen alırsak sıfır hacim ve sonsuz yoğunluk noktasıdır, ki bu da saçma bir şey. Ne var ki 1960'larda Stephen Hawking ve Roger Penrose gösterdi ki, genel görelilik kuramı şayet evrenin nasıl işlediğini doğru tarif ediyorsa (ki ikili atarca da dahil bütün delillerin ışığı altında öyle görünüyor), bu durumda zamanın başlangıcında bir tekilliğin varlığı kaçınılmaz. Bugün çevremizde gözlemlediğimiz türden genişleme Einstein'ın denklemleriyle birleşince başlangıçta bir tekilliğin olduğunu kanıtlıyor.

Peki bu rahatsız edici sonuç yanlış türden bir analoji kurmanın mı sonucu? 1980'lerde Hawking evrenin kökeni bilmecesine geri

dönüp başkalarıyla birlikte evreni genel görelilik kuramının yanı sıra kuantum mekaniği fikirlerini de içine alan bir modelde tarif etme girişiminde bulunmuştu. Pek çok evrenbilimciyi "birçok dünya" ya da "birçok geçmiş" fikrinde bazı çeşitlemeler gerektiği düşüncesine sevk eden bu çalışmadır. Çünkü bir gözlemcinin evrenin "dışarısında" olup dalga fonksiyonunu çökerterek bir üst-üste-binme durumundan tek bir geçmişe dönüştürmesinin hiçbir yolu yoktur. Fakat Hawking'in yaklaşımının başka dikkat çekici bir özelliği vardır, Büyük Patlama'ya farklı bir perspektif kazandıran yeni bir analoji.

Görelilik denklemlerinde (hem özel hem genel görelilik kuramlarında) zaman ile uzayın ele alınış biçiminde önemli bir fark olduğunu söylemiştim. Zamanın denklemlerde önünde bir eksi işaretiyle bulunduğundan söz etmiştim. Fakat meselenin tamamı bu değildir, çünkü denklemler Pisagor'un ünlü dik üçgen teoremindeki gibi *kareler*le de ilgilenir. O halde, Einstein'ın denklemlerinde uzamsal yer değiştirmeleri temsil eden parametreler kareyle ifade edilir: x^2, y^2 ve z^2 . Fakat zamansal yer değiştirmeyi gösteren parametre *negatif* kareyle ifade edilir: $-t^2$. Zamanı aynen uzay gibi ele almayı engelleyen işte budur, çünkü hepimizin okullarda öğrendiği gibi negatif bir sayının karekökü alınamaz. Eğer x^2'yi biliyorsanız o zaman x'in kolay anlaşılır bir anlamı vardır; mesela 4'ün karekökü 2'dir. Fakat elinizde $-t^2$ varsa, bu bize t hakkında hangi bilgiyi verir? Sözgelimi, *eksi* 9'un karekökü kaçtır?

Hawking evrenin başlangıcındaki –zamanın "eşiği"ndeki– tekillik sorununun, basit sayılabilecek bir matematik aygıtına başvurarak çözülebileceğine işaret etti. Matematikçiler negatif sayıların karekökleri hakkında her şeyi biliyorlar. Bunlar 200 yılı aşkın süredir matematiğin bilinen bir özelliği ve matematikçiler tek bir basit numarayla bunlarla istedikleri gibi oynayabiliyorlar. Bunun için i diye bir "sayı" icat ettiler, tanımı "eksi birin karekökü". Yani i x i ifadesi -1'e eşit. O zaman, eğer -9'un karekökünü bulmak isterseniz -9'un (-1) x 9'a eşit olduğunu ve karekökün de -1'in karekökünün 9'un kareköküyle çarpımına eşit olduğunu söylersiniz, yani kısaca i x 3. Böyle "sanal sayılar"la sıradan sayılar gibi bu şekilde oynanabilir –toplama, çarpma, bölme vs.– ve bunlar matematiğin önemli bir bölümüdür. Matematikçilere tarif edilemeyeni, negatif sayıla-

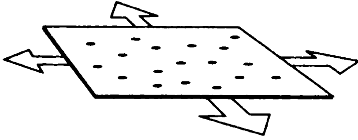
rın karekökleri dünyasını tarif etmede kullanmak için bir model sağlar ve "gerçek" sayıların işleme biçimiyle kurulan analoji doğrultusunda işlerler.

Hawking'in cüretkâr hamlesi, bizim gündelik hayattaki zaman algımızın yanlış olduğunu ve evrenin işleyiş şeklinin daha iyi bir modelinin sanal zamanda (*i t*) ölçümler kullanmaya geçerek elde edileceğini önermesi olmuştur. Matematiksel açıdan basit bir değişikliktir bu; haritacılıkta dünyanın resmini elde etmek için yapılacak projeksiyon tercihindeki değişiklik kadar önemlidir. Örneğin, geleneksel Mercator izdüşümü kıtaların genel olarak şeklini doğru gösterir, fakat birbirlerine göre nispi alanlarını bozar; öte yandan 1970'lerde geliştirilmiş Peters izdüşümü kıtaları doğru nispi oranlarında gösterir, fakat şekillerini bozar. Her iki izdüşüm (ve diğerleri) de yerkürenin bütün yüzeyinin düz bir kâğıt yaprağına çizilmiş haritasını gösterir. Bir kürenin yüzeyini düz bir kâğıt üzerinde kusursuz olarak göstermek imkânsız olduğundan hiçbir izdüşüme "doğru" deyip, ötekilere "yanlış" denemez. Sadece farklıdırlar.

Benzer biçimde, matematikçiler de uzay ve zamandaki olayların konumlarını tanımlarken kullandıkları koordinat sistemlerinin pek çok yanını seçmekte özgürdürler. Başka bir coğrafi örnek vermek gerekirse, boylam ölçümünü Londra'daki Greenwich'ten geçen meridyene göre yapmamız tamamen tarihsel bir tesadüftür. Rota belirleyen subaylar gezegenimizin Kuzey ve Güney kutuplarını birbirine bağlayan sanal çizgi meridyenlerden herhangi başka birini de "0 boylam" olarak kullanabilirdi.

Hawking'in "sanal zaman"a geçişi o kadar basit bir şey değildir, fakat sadece matematik koordinatlarının seçimindeki bir değişikliği içerir ve Einstein'ın denklemlerindeki zaman parametresini uzay parametreleriyle tamamen aynı kefeye koyma gibi önemli bir sonucu vardır. Eğer zaman *i t* birimleriyle ölçülüyorsa, bu durumda zaman ölçümlerinin karesi alındığında i^2 x t^2 birimlerini elde ederiz, bu da (-1) x t^2 ya da $-t^2$'dir. Şimdi bu negatif sayıyı Einstein'ın denklemlerine giren eksi işaretiyle çarparız, o da i^2'den elimizde kalan (-1)'i götürür ve geriye sadece t^2 kalır (şu eski "iki negatif bir pozitif yapar" sözünü hatırlayalım).

Bu model değişikliği ya da farklı bir matematik analojisi tercihi Einstein'ın denklemleri açısından zamanı fiilen *tamamen* uzay

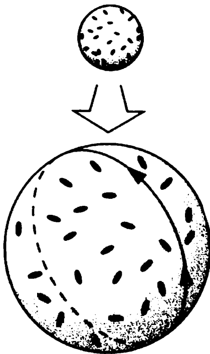


22 Genişleyen evren, aynı anda bütün yönlere gerilen lastik bir tabaka olarak düşünülebilir. Noktalar galaksileri simgeler. Galaksiler, aralarındaki "uzay" genişlediği için birbirinden uzaklaşır – uzayda hareket ettikleri için değil.

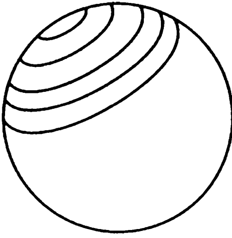
gibi yapmıştır. Ve bu mütevazı matematiksel değişiklik denklemlerden tekilliği kaldırır.

Hawking'e göre şimdi genişleyen evreni matematiksel bir noktadan (tekillikten) çıkan ve büyüyen bir uzay-zaman baloncuğu gibi değil, sabit bir boyutta kalan bir kürenin yüzeyine çizilmiş enlem çizgileri gibi düşünmemiz gerekir. Küredeki kuzey kutbunun çevresine çizilen minik bir daire evreni daha gençken gösterir – uzayın tamamı daireyi oluşturan çizgiyle gösterilir. Evrenin genişlemesi kutbun uzağına ama ekvatorun yakınına çizilmiş çizgilerle gösterilir, her biri bir önceki daireden daha büyük. Kutuptan ekvatora doğru gerçekleşen hareket zaman "akışı"nı gösterir. Ekvatoru geçip de ardışık enlem daireleri küçüldükçe "evren" tekrar küçülmeye başlar ve sonunda güney kutbunda gözden kaybolur.

Fakat kutuplarda neler olur – zamanın başlangıcı ve sonu mu? Bu noktalarda, zamanın kuzey kutbunda "başlamış" olduğu söylense de, kürenin "eşiği" yoktur. Zaman uzayla aynı matematiksel kefeye konduğundan, dünyanın coğrafyasıyla kurulan analoji mü-



23 Evren neredeyse düze yakın da olsa kapalı olabilir. Bu durumda, genişleyen bir sabun köpüğünün kabuğuna benzetilebilir; Şekil 22'deki gibi buradaki noktalar da galaksileri göstermektedir. Ne var ki böyle bir durumda, evreni çepeçevre daima düz bir doğrultuda dolaşıp tekrar başladığınız noktaya gelme gibi tuhaf bir ihtimal de söz konusudur, tıpkı dünyayı da çepeçevre dolaşmanın mümkün olması gibi.



24 Aynı temanın Stephen Hawking çeşitlemesinde, hem uzay hem zaman (bütün dört boyut) bir kürenin yüzeyiyle gösterilir. Evren sıfır zamanda kuzey kutbu etrafındaki minik bir daire olarak başlar ve gitgide daha büyük daireler haline gelir, zamanla aşağıya "ekvator"a doğru hareket eder. Sonra "güney kutbu"na doğru zamanda hareket ederken küçülüp bir hiç olur. Fakat uzay-zamanın bir "eşiği" yoktur, tıpkı dünyanın Kuzey Kutbu'nda bir "eşik" olmadığı gibi. Bu sunumun amacı "Büyük Patlama"dan önceki ya da "evrenin ölümünden sonraki" zaman hakkında konuşmanın neden mantıksız olduğunu göstermektir.

kemmeldir. Gezegenimizin Kuzey Kutbu'nda bütün yönler "güney" dir ve "kuzey" diye bir yön yoktur – ama orada gezegenin eşiği yoktur. Aynı şekilde Hawking'in evren modelindeki kuzey kutbunda bütün zaman yönleri "gelecek"tir ve "geçmiş"e karşılık gelen bir yön yoktur – ama orada zamanın eşiği yoktur. Tekillik sorunu ortaya çıkmaz.

Eğer zamanda Büyük Patlama'ya kadar geriye gidebilseydiniz tekillik içinde kaybolup gitmez, "sıfır zaman" noktasından (anından) geçip kendinizi tekrar geleceğe doğru yola çıkmışken bulurdunuz, tıpkı yerküredeki Kuzey Kutbu'nun biraz güneyindeki bir kişinin kuzey yönünde yürüyüp kutbu geçerek aynı yönde devam edip bu sefer yönünün güneye doğru olduğunu görmesi gibi. Bu tabloda evren hiçten genişleyen ve tekrar hiçe dönen tamamen müstakil bir uzay-zaman ve kütle-enerji paketi olarak görülür.

Bütün bunlar basit bir koordinat dönüşümü sayesinde zamanı uzayla aynı kefeye koyarak olmuştur. Ne yazı ki matematik dilinde *i*'yi içeren sayılar geleneksel olarak "sanal" sayılar olarak anılır, bu da onları sanki bilimkurgudan çıkmış gibi gösterir ya da *Alice Harikalar Diyarında*'dan.[90] Fakat bu aslında olaylara matematiksel olarak bakmanın saygın bir yoludur; fiziksel açıdan da geleneksele göre *daha* makul bir yol gibi görünür zira o korkulan tekilliği içermez.

90. Bu terminoloji seçimi iki kere talihsizdir, zira aslında Hawking'in yaptığı, zamana *sanal uzay* gibi davranmaktır; denklemlerde $i\,t$ terimi x, y ya da z ile tamamen aynı rolü oynar.

Bunun ortaya çıkardığı ihtimalleri araştırmanın başka yolları da var. Hawking zamanı "özelleştirdi"; Ilya Prigogine şeylerin işleyişine ilişkin kendi yaklaşımının, yaradılışı uzay-zamanda her yerde bir anlamda aynı anda devam eden bir olay gibi ele alarak uzayı "zamanlaştırmak" olduğunu söyledi. Fakat şimdi bu modelin ayrıntılarına girmek istemiyorum; tek yapmak istediğim Hawking'in tekillik sorununa bulduğu çözümün, Augenstein'ın matematikteki her şeyin gerçekliğin fiziksel olarak anlamlı bir modeline çevrilebileceği fikrine çok yakın olduğuna işaret etmek. Fizik, marangozluğun iş olması anlamında iştir, o da hammaddeden ürünler çıkarır. Marangoz ahşaptan mobilya yapar; fizik de matematikten dünyanın modellerini yapar. İki yüzyıl önce sanal sayıları çalışmak matematiğin çoktan gelişmekte olan yeni bir dalıyken, bir gün evrenin nasıl meydana geldiğini açıklamada kullanılacağı kimin aklına gelirdi?

Tabii uygulanması fizikçilerin ve astronomların bir dünya görüşü ya da modeli geliştirmelerini beklemek zorunda kaldı; derken bu modelde sorunun ele alınış biçimi çözümün sanal zamanla olacağını bariz kıldı. O halde fizikçiler dünyayı nasıl kavradılar da şu anki gerçeklik tarifini buldular?

Gerçekliği Kavramak

Fizikçilerin gerçeklik modellerini bulmaya (ya da icat etmeye) fiilen nasıl koyulduklarına dair en son ve en ikna edici açıklamalardan birini Güney Kaliforniya Üniversitesi'nden Martin Krieger ilgi uyandırıcı kitabı *Doing Physics*'te (Fizik Yapmak) sunmuştur. Krieger 20. yüzyılın ikinci yarısında geliştirilmiş analojiler ve modellere bakıp bunların köklerinin nasıl modern kültürle (özellikle bu dönemde Amerikan kültürüyle) sıkı sıkıya bağlı olduğunu göstermiş, ayrıca önceki kuşakların kullandığı analoji ve modellerle de bağlantı kurmuştur – KKD'nin KED'e ve dolayısıyla Maxwell denklemlerine benzerliği en bariz örnektir. Bu çalışmanın bir kısmı bazı filozofların –başta 1930'lardan itibaren Karl Popper olmak üzere[91]– 20. yüzyıl bilim insanlarının çalışmalarını analiz etme biçimi-

91. Bkz. mesela Popper, *Bilimsel Araştırmanın Mantığı*, çev. İknur Aka ve İbrahim Turan, İstanbul: YKY, 1998.

ni andırıyor. Fakat Krieger'in fizik geleneğinden gelmesi başka fizikçilerin onu dikkate alma konusunda daha hevesli olmasını sağlıyor olsa gerek, ayrıca hikâyenin onun anlattığı versiyonu hem güncel hem de gayet inandırıcı.

Krieger fizik eğitimi aldığı için pek çok bakımdan fizik terminolojisi kullanır fakat bunu gündelik hayattaki dile çevirir. Örneğin, bir sistemin özelliklerini bir fizikçinin "serbestlik dereceleri" olarak nitelediği yerde Krieger bu özelliklere "tutamaç" adını verir, zira bu tutamaçlar aracılığıyla sistemi kavrar ve nasıl bir şey olduğu hakkında bir fikre sahip oluruz. İçi gazla dolu bir kutunun sıcaklığı basit bir örnek olabilir; bu bir serbestlik derecesidir, sıcaklığı bilmemiz kutu içindeki gazın genel şartları hakkında bize bir şey söyler. Tek bir atomun konumu serbestlik derecesine başka bir örnektir – fakat sıcaklığı bulmanız için kutudaki her gaz atomunun konumunu bilmeniz gerekmez. Dünyanın "gerçekten" ne olduğunu söylemeye çalışmak yerine Krieger her şeyin analojiye dayalı olduğunu vurgular, fizikçilerin dünyayı nasıl kavradığını ve nasıl tarif ettiğini tarif eder (serbestlik derecelerinin sağladığı tutamaçları kullanarak). Dünya pek çok şey "gibi" olabilir –dalga ya da bilardo topu veya her neyse– tabii gerçekten bunların kendisi *olmaksızın.*

Fakat Krieger'in analoji kullanımı benim daha önce kullandığım örneklerden çok daha derine iner. Onun derin bir içgörüye sahip fikirlerinden biri, atomaltı dünyasının işleyişini bir fabrikanın ya da bir ülkenin ekonomisinin işleyişi gibi görmektir. Dışarıdan bakan biri hammaddenin girişini ve tamamlanmış ürünün çıkışını incelediğinde gerçek üretim sürecini iş başında göremez çünkü bu süreç duvarların arkasına gizlenmiştir; fakat gözlemci fabrikanın girdisiyle çıktısını karşılaştırarak üretim süreci hakkında çıkarsamada bulunabilir. Duvarlar fabrikadaki üretim sürecinin ayrıntılarını gizler –serbestlik derecelerini saklar– ve fabrikayı bir kara kutuya indirger. Dışarıdaki kişi belli bir girdinin belli bir çıktı yarattığını görür. Krieger bunu bir atomun etrafındaki elektron bulutunun onun kimyasal davranışından sorumlu oluşuna ve atomun iç işleyişini saklayışına benzetir. Kimyasal tepkimelerde önemli olan en dıştaki elektronların, başka atomların en dışındaki elektronlarla yaptığı etkileşimdir ve atomları bir arada tutanın ne olduğunu bilmenize gerek yoktur.

Duvarlar önemlidir çünkü karmaşık durumları basitleştirip bir sistem hakkında bilinmesi gereken her şeyi bilmeksizin dişe dokunur fizik yapmayı mümkün kılarlar. Böylece fizikçiler duvarlar icat ederler, buradaki püf noktası bunların doğru türden duvarlar olmasına dikkat etmektir. Aslında fizikçiler mümkün olduğunca çok sayıda serbestlik derecesini gizler ve geriye kalan üç-beş serbestlik derecesini değiştirmenin sonuçlarını –yani, sistemi geride kalan "tutamaçlar"ından tutup sallamanın etkisini– incelerler.

Sıcaklık iyi bir örnektir. Bir kutudaki gazla yapılan pek çok deneyde fizikçilerin yaptığı ilk şey gazın sıcaklığı sabit bir değere gelene kadar beklemektir – yani gaz "termodinamik denge"ye gelene kadar. Sonra, gazın başka özelliklerini –mesela gazı yarı büyüklüğündeki bir kutuya sıkıştırırken meydana gelen basınç değişikliğini– incelerken sıcaklığı dert etmenize gerek kalmaz (uygulamada, bu basit deneyi gerçekleştirmek için kutunun, sıcaklığı sabit olan büyük bir nesneye –"ısı banyosu"– bağlanması gerekir, böylece gaz sıkıştırıldığında kendi sıcaklığının değişmediğinden emin olursunuz). Eğer sıkıştırma işini bir yandan da gazı dışarıdan ısıtarak yaparsanız o zaman bütün serbestlik derecelerinin değişimini çözmek ve gaza neler olduğunu görmek çok daha zor olacaktır. Eğer doğru serbestlik derecelerini seçip incelerseniz işin fizik kısmı çok basit olur; ama serbestlik seçiminde bir hata yaparsanız o zaman bu durumun çözülmesi korkunç zorlaşabilir. Steven Weinberg'in yorumladığı gibi "bir sistemi tarif etmek için istediğiniz serbestlik derecelerini kullanabilirsiniz, ama yanlış olanları kullanırsanız, üzülürsünüz."[92]

Krieger fabrika analojisini genişleterek fizikçilerin parçacık kavramını, becerileri, hareketlilikleri ve ücret talepleri gibi özellikleriyle fabrikadaki işçilere benzetir. "İşçilerin" özellikleri parçacıklara iliştirdiğimiz etiketlerle tanımlanır – yüklerini, kütlelerini ya da güçlü etkileşime gösterdikleri tepkilerinin gücünü tanımlamak için kullandığımız etiketler. "Parçacıklar,"[93] der Krieger, "yerelleştirilmek ve ayrılmak; kararlı, nesnel, isimli ve tekil olmak üzere tasarlanmıştır." Bir kere daha, asıl nokta şu ki fizikçiler atomaltı parçacıklarının içini yoklayıp parçacık bulmazlar; işe bilardo toplarının na-

92. Aktaran Krieger, *Doing Physics*, s. 30.
93. Bunu ve sonrakini aktaran Krieger, *Doing Physics*, s. 22-3.

sıl bir şey olduğu fikriyle başlar ve parçacıkvari cevapları getirecek türden sorular sorarlar (serbestlik derecelerini seçerler).

Doğayı naif sezgilerimize uydurmaya çalışırken, gündelik hayattaki bilardo topu ya da duvar kavramımız acaba bizi yanlış mı yönlendiriyor diye düşünebiliriz. Durum pekâlâ öyle olabilir. Fakat burada etkileyici olan şey naif sezgilerimizi değiştirme biçimimiz; kendimize, gündelik nesnelerin (doğa için model teşkil edecek olan) doğru özelliklerini fark etmeyi öğretmemizdir.

İyi bir örnek *spin* diye bilinen kuantum özelliği olabilir. Fizikçiler elektronun etiketi için sadece kütle ve yükten başka bir şeye daha ihtiyaç olduğunu keşfedince yeni bir etiket bulmak için bilardo topunun dönme biçimiyle bir analoji kurdular. Analoji tam değildir, çünkü eğer elektronu dönen bir parçacık olarak görmekte ısrar ederseniz başladığı yere gelmesi için 360 derece değil 720 derece (*iki* tam tur) dönmek zorunda olduğunu hesaba katmanız gerekir.[94] Fakat fizikçiler bu acayip özelliği bir bilardo topunun ya da dünyanın dönüşüne benzer olarak düşünme konusunda kendilerini eğitmişlerdir.

Duvarların ve işçilerin yanı sıra fizikçilerin dünyasının üçüncü bileşeni alandır. Alan bir parçacığın tam antitezidir – belli bir yerde olmak yerine yayılmıştır, keskin hatlı olmak yerine yumuşak bir şekilde değişir. Fakat alanlar daima parçacıklarla bağlantılıdır. Krieger'in belirttiği gibi "kusursuz" bir parçacık tamamen müstakil olurdu; onu tutup sallayabileceğimiz bir tutamacı olmazdı – sadece kütle çekimsel alan veya elektromanyetik alan (ya da her neyse) parçacıklardan sızdığı için onların orada olduğunu biliriz.

Fakat yine de bu, alanın "gerçek" olduğu anlamına gelmez; parçacıklar ne kadar gerçekse ya da bir elektron ne kadar topaç gibi kendi ekseni etrafında fır dönüyorsa alan da o kadar gerçektir. Daha doğrusu, benim görmek istediğim haliyle, *bütün* modeller gerçektir, tamamlanmamış olsalar bile. Krieger'in söylediği gibi, modeller dışında başka hangi gerçeklik vardır ki? Pickering gibi Krieger de fizikçilerin işlerini öğrenme ve geçmişte başarısını ispat et-

94. Richard Feynman model olarak bir fincan kahve alarak iki tam devrin sizi başladığınız yere nasıl getireceğine dair çok hoş bir örnek vermiştir, *Elementary Particles and the Laws of Physics*, s. 29.

miş teknikleri taklit etme biçimini anlatır. Bu tekniklerin en güçlülerinden biri her şeyin daha küçük parçalardan meydana geldiğini varsaymaktır. Krieger kurma saat analojisinin gücünü ele alır ve şöyle söyler (s. 33): "Bir saat bütün bileşenlerinin ayrı ayrı yaptığından çok daha az şey (ama muhtemelen daha ilginç şeyler) yapar" – serbestlik derecelerinin sayısını sınırlamanın iyi bir fikir olabileceğine başka bir örnektir bu. Fakat Maxwell'in etkileşim içindeki dişli ve çarklardan oluşan saatvari bir sistemin ara aşamalarından geçerek o ünlü dalga denklemlerine nasıl vardığının ayrıntılarını vermez.

Geleneksel olarak bu basamağa elzem olmayan bir aygıt olarak bakılır, tıpkı bir hastanın yürümeyi başardıktan sonra atabileceği bir koltuk değneği gibi. Ne var ki işe yaramıştır. Bezdirici ve zevksiz olabilir, fakat elektromanyetik kuvvetlerin yayılma biçimine bir model oluşturmaktadır. Alan kuramı "daha iyi"dir çünkü daha basit ve daha yalındır bizim için; fakat kurulu saat modelinin, bize çirkin ve kaba gelse de, işe yarar hale getirilebileceği olgusu, en sevdiğimiz analojilerin dünyanın işleyişi hakkındaki tek gerçeği göstermediğini hatırlatan önemli bir noktadır. Fizikçiler doğanın belli bir biçimde işlediğini söyledikleri zaman, der Krieger, gerçekte modellerin meşru olarak o biçimde işler hale *getirilebileceğini* söylerler.

İşte büyük çoğunlukla hesaba katılmayan ama hâlâ geçerli olan bir başka metafor örneği. Tamamen saf enerjiden yaratılan elektron-pozitron çiftinden bahsederken bunu, $E = mc^2$'ye göre enerjinin kütleye dönüştürülmesi çerçevesinde ele aldım. Fakat Paul Dirac bugün karşı-parçacık diye bilinen şeylerin var olma olasılığını 1920' lerin sonunda ilk gündeme getirdiğinde farklı bir modelle çıkagelmişti. Gerçekliğin bu versiyonunda boşluğun (*vacuum*) "hiçliği" bir elektron deniziyle doludur, bütün olası *negatif* enerji seviyeleri dolmuştur. Biz bu elektronları fark etmeyiz çünkü her yerdedirler ve onları çevrelerinden ayırt edecek hiçbir dayanak sunmazlar. Eğer bir duvar tek renge boyanmışsa (kırmızı diyelim), o zaman duvardaki her nokta diğer bütün noktalar kadar kırmızıdır ve hiçbir nokta öne çıkmaz. Sıradan (pozitif enerjili) bir elektron "fark edilir" çünkü yanıbaşındakiler ondan farklıdır, kırmızı arka plandaki mavi bir nokta gibi.

Bu tabloda elektron-pozitron çiftinin yaratılması, yeterince enerjili bir fotonun negatif enerjili bir fotona çarpması ve ona pozitif

enerji durumuna "terfi etmesine" yetecek kadar enerji vermesiyle meydana gelir. Böylece negatif enerjili parçacık bildik anlamda "gerçek" bir elektron olur (mavi bir nokta) ve negatif enerjili elektron denizinde geride bir delik bırakır (kırmızı arka planda beyaz bir nokta). Bu delik pozitif yüklü bir elektronun bütün özelliklerine sahiptir – yani pozitrondur. Örneğin, yanı başında pozitif bir elektrik yükü varsa, bütün negatif enerjili elektronlar o yüke doğru hareket etmeye çalışır. Omuz omuza sıkıştıkları yerde kıpırdayamazlar. Fakat deliğin yanındaki elektron, deliğin içine sıçrayarak ileri doğru gidebilir (tabii arkada bir delik bırakarak) ve bu böyle devam eder. Bunun sonucunda delik pozitif yükten uzağa hareket eder – tıpkı pozitif yüklü parçacığa olacağı gibi, itilmiştir. Negatif enerjili denizde, elektronun *yokluğu* çevresiyle bir fark yaratır, yani bir parçacığın ayırt edici özelliklerinden biri olan "keskin hatları". Delik kalır ve parçacık gibi davranır, ta ki pozitif enerjili elektron deliğe düşüp enerjisini elektromanyetik ışıma biçiminde bırakana kadar.

Maxwell'in dişli çarkları ve burgaçları gibi, parçacıklarla karşıparçacıklar arasındaki etkileşimlere ilişkin bu model de saf enerjiden parçacık yaratmanın "hakiki" resmine giden bir ara basamak olarak görülüyor şimdi. Fakat tamamen makul, kendi içinde tutarlı bir model. Hesaplamalara temel olarak kullanılabilen ve deneylerde ölçülen pozitron özelliklerini doğru tahmin edebilen bir model. Ayrıca, hatırlarsak, pozitronları zamanda geriye doğru hareket eden elektronlar olarak açıklayan aynı derecede tatminkâr bir model daha var. Evreni negatif enerjili elektronlarla dolu olarak düşünmek bizi rahatsız edebilir, fakat bu bizim sorunumuz, evrenin değil. Araştırmak istediğimiz serbestlik derecelerini seçmekte özgürüz, bu seçimler de bizim doğaya atfettiğimiz özellikleri belirler. Analoji fizikte *her şey*dir, kurduğumuz modeller kendi içinde tutarlı olduğu ve deneylerle test edilip onaylanabilen tahminlerde bulunduğu sürece istediğimiz analojiyi kurmakta, istediğimiz serbestlik derecelerini seçmekte serbestiz. Bu da beni pek çok kuantum yorumundan hangisinin "en cazip teklif" olduğu sorusuna geri getiriyor.

Kuantum Gerçekliğine Toplu Alım Yaklaşımı

Bence en iyi cevap pekâlâ hepsini birden satın almak olabilir. Yorumların her biri geçerli bir model, yine her biri dünyanın nasıl işlediği konusunda bize yararlı fikirler sunuyor. Aslında her bir kuantum yorumuna kendi başına bir serbestlik derecesi olarak bakmak yerinde olur ve Weinberg'in özdeyişiyle belli bir durumda ihtiyaçlarımıza en çok uyan yorumu seçmekte özgürüz. Yanlışı seçerseniz, üzülürsünüz – mesela Schrödinger'in kedisini "açıklamak" için Kopenhag Yorumu'nu seçmek gibi. Ama doğrusunu seçerseniz –bu durumda birçok dünya yorumu– o zaman her şey kolayca anlaşılır olur. İyi bir fizikçi alet çantasında her kuantum yorumunu taşımalı ve belli bir kuantum bilmecesiyle karşı karşıya kalınca eldeki en uygun kuramı uygulamalıdır.

Bunu kanıtlamak için mevcut yorumların bazılarından bir hatırlatma yapıp 20. yüzyılın ikinci yarısında kuantum fiziğindeki en önemli gelişme olan Bell teoremiyle bağlantılarından söz edeceğim. Kabul edilebilir bir kuantum gerçekliği versiyonunun Aspect deneyi sonuçlarıyla bağdaşması gerekir – ki bunların *hepsi* de bağdaşıyor!

Şu bizim eski Kopenhag Yorumu'nun Bell teoremiyle ve Aspect deneyiyle bir sorunu yok, çünkü Niels Bohr ve meslektaşları bize baştan beri bir deneyin sonucunun tüm deney düzeneğine bağlı olduğunu söylemişlerdi. İki delik deneyinde iki delik de açıksa girişim elde ederiz; sadece bir delik açıksa etmeyiz. Eğer tüm deney düzeneği galaksinin iki zıt ucundaki fotonları içeriyorsa, o zaman, işin içine "hayalet işi uzaktan etki" girse bile iki fotonu da hesaba katmamız gerekir. Keza, gerçeklik eğer bir ölçüm edimiyle yaratılıyorsa, Aspect deneyinin sonuçlarını anlamak için tek yapmamız gereken, yaratılan geçekliğin sadece ölçümün yapılmakta olduğu civardaki gerçeklik olması gerekmediğini, aynı zamanda çok uzaktaki, ölçümden çıkan ışık sinyallerinin ulaşmaya henüz zaman bulamadığı yerlerdeki gerçeklik de olduğunu kabul etmektir.

Ya da, dünya gerçekten "gerçek" olabilir, David Bohm ve takipçilerinin ileri sürdüğü gibi. Ama öyleyse, Bohm'a göre, bölünmez bir bütünlük içinde olması gerekir, öyle ki, yine, bir yerdeki bir

araştırma çok uzakta bir tepki yaratabilir, yerbilmez biçimde ve hemen. Hem bunda hem de istatistik yasalarına uyan pilot dalgadan etkilenen gerçek özellikli gerçek parçacıklara ilişkin fikirde, anında kurulan "haberleşme" evrenin geri kalan kısmının durumunu hesaba katarak deneyin sonucunu etkiler; fakat insan gözlemciler arasında işe yarar bilgi içeren, ışıktan daha hızlı hiçbir sinyal yayınına izin vermemeyi yine başarır.

Birçok dünya yorumu biraz farklı bir kategoridedir, çünkü bütün olası deneylerin bütün olası sonuçlarının eşit derecede gerçek olmasına izin verir. Fakat, daha önce sözünü ettiğim gibi, kesinlikle yerbilmezdir, zira yeryüzündeki bir kuantum olayının sonuçlarının seçimi anında uzaktaki galaksilerdeki gerçekliğin çoklu kopyalarının yaratılmasına yol açar (ve o galaksideki değişiklikler burada yeryüzündeki gerçekliğin çoklu kopyalarına bölünmesine sebep olur). Ama yine de kendi içinde tutarlı bir kuantum gerçekliği yorumu olarak işe yarar.

John Bell kuantum kuramının rakip yorumlarını ele alırken her şeyi yerli yerine koyuyor:

> Bu olası dünyalar ne ölçüde kurmacadır? İnsan beyninin serbest icatları olmaları anlamında edebi kurmacalar gibidirler. Kuramsal fizikte bazen mucit, eserinin daha baştan kurmaca olduğunu bilir, örneğin bu çalışma üç yerine bir ya da iki boyutlu uzayı olan basitleştirilmiş bir dünyayla ilgiliyse. Çoğunlukla geç vakte kadar, hipotezin yanlış olduğunun anlaşıldığı o vakte kadar, işin içinde kurmacanın olduğu bilinmez. Ciddi olunduğunda, bile isteye basitleştirilmiş modeller araştırıldığında kuramsal fizikçi hikâyenin belki de gerçek olduğunu düşünmesiyle romancıdan ayrılır.[95]

Fakat bu tür umutlar boş umutlardır. *Bütün* modeller, hangi serbestlik derecesini gerçekliği kavrayacak tutamaç olarak kullanacağımızı seçmemizle kasten basitleştirilmiştir; duyularımızla dolaysız ulaşma alanımızın dışındaki bütün dünya modelleri kurmacadır, insan zihninin serbest icatlarıdır. Size en çok hitap eden kuantum yorumlarından istediğinizi seçmede, hepsini reddetmede, bütün paketi satın alıp kolaylığına ya da haftanın gününe veya kafanıza göre farklı bir yorum kullanmada özgürsünüz.

Ama yine de, hemen herkes "cevabı" bilmek istiyor. *Gerçekten*

95. Bell, *Speakable and Unspeakable*, s. 194-5.

gerçek modeli bulma arzusu kuramsal fizikçileri eyleme sevk eden şeydir, tıpkı başka insanları felsefeye ya da belli bir dinin mensubu olmaya teşvik ettiği gibi. Zihnimin mantıksal kısmı bu arayışın nafile olduğunu ve bulmayı umabileceğimiz tek şeyin çağımızın kendi içinde tutarlı bir miti olduğunu söylese de bende hâlâ bu özlem var. Yani, her şeye rağmen, benim şimdilik kuantum gerçekliği pazarındaki en cazip teklif olduğunu düşündüğüm, sadece bütün yerbilmezlik meselesini ön plana çıkarmakla kalmayıp fizikçilerin dünyaya bakışlarını değiştirmek üzere olduğuna inandığım analojiler ve metaforlar da sunan yorumdan söz etmeden geçmeyeceğim.

Martin Krieger *Doing Physics*'te fizikçilerin ne yaptıklarını anlamada çok işe yaramış pek çok analojiden bahseder. Fabrika ve işçileri, çeşitli ekonomiler, bildik kurma saat modelleri, hatta akrabalık sistemleri kitaptaki yerlerini alır. Ama, der Krieger (s. xix) "evrim ve organizmada olduğu gibi öteki belli başlı analojiler görünüşe göre fiziğin büyük bir bölümünde çok daha küçük bir rol oynar."

Bunun şimdilerde düzeltilen tarihsel bir gaflet olduğunu sanıyorum. *In the Beginning* (Başlangıçta) adlı kitabımda bahsetmiştim: Galaksi, hatta evrenin kendisi gibi nesneleri adeta canlı, evrim geçiren organizmalar gibi ele alarak astronomlar ve evrenbilimciler dünyanın doğasını, kökenlerini ve nihai akıbetini kavramada yeni ufuklar açıyorlar. Ve canlılara ilişkin anahtar kavramlar da işlem yorumu denilen, benim en sevdiğim kuantum kurmacasında gösteriyor kendini. Bunun bir kurmacadan başka bir şey olduğunu iddia ediyor değilim; bütün bilimsel modeller Kipling'in bize neler olup bittiğini anladığımız hissini veren o "her şeyin yerli yerinde" olduğu hikâyeleri gibidir, evren hakkında nihai cevaplar içermeleri şart değildir. Fakat şimdilik inanabileceğiniz ve daha iyi (ya da daha moda) bir şey tarafından yerinden edilmesinin muhtemelen uzun süreceği bir hikâye istiyorsanız işlem modelini öneririm. Önsöz'den sonra aradaki bütün bölümleri atlamış okurlarla tekrar buluşmak üzere olduğumuz şu noktada, kararlı adımlarla yola devam ederek kuantum gizemlerinden bütün gizemi gerçekten alıp götüren bir gerçeklik versiyonu sunmamın zamanı geldi.

Sonsöz

Çözüm - Çağımızın Miti

Kuantum dünyasının gizemlerini anladığımıza kendimizi ikna etmek için açıklamamız gereken temel sorun Önsöz'de anlattığım Schrödinger'in yavru kedileri hikâyesinin içindedir. Hatırlarsanız deney öyle kurulmuştur ki, iki yavru kedi uzayda birbirlerinden çok uzaktadır, fakat ikisi de iki uzay gemisinin birinde ya da ötekinde "gerçek" bir parçacık olmak için bir elektronun dalga fonksiyonunun çökertilmesine bağlı yüzde elli olasılık dalgasının etkisi altındadır. Kapsüllerden biri açılıp akıllı bir gözlemci elektronun içeride olup olmadığını fark ettiği an olasılık dalgası çöker ve yavru kedinin kaderi belirlenir – hem sadece o kapsüldeki kedinin kaderi değil, *aynı anda* evrenin öbür yanındaki öteki kapsüldeki öteki kedinin kaderi de belirlenir.

En azından, iki kedinin birbiriyle ilişkisinin standart Kopenhag Yorumu böyle. Ayrıca, hangi kuantum yorumunu tutarsanız tutun Aspect deneyi ve Bell eşitsizliği, kuantum varlıklarının bir kere bir etkileşim içinde dolanık oldular mı, ondan sonra daima adeta Einstein'ın "hayalet işi uzaktan etki"sinin tesirindeki tek bir sistemin parçalarıymış gibi davrandıklarını gösteriyor. Bütün, parçalarının toplamından büyüktür, bütünün parçaları da geribeslemelerle birbirleriyle bağlantılı hale gelir – anında işliyor gibi görünen geribeslemeler.

İşte canlı sistemlerle verimli bir analoji kurmaya başlayabileceğimiz yer burası. Bedenimiz gibi canlı bir sistem kesinlikle parçalarının toplamından büyüktür. İnsan bedeni milyonlarca hücreden oluşur, fakat uygun sayıdaki bir yığın hücrenin asla yapamayacağı şeyleri yapabilir; hücreler de kendi başlarına canlıdırlar ve içerdikleri elementlerin basit bir karışımının yapamayacağı şeyleri yapa-

bilirler. İki durumda da canlı hücrelerin ve canlı bedenlerin böyle ilginç şeyler yapabilmesinin kilit sebeplerinden biri, bilgi taşıyan geribeslemelerin olmasıdır – hücrenin bir yanından öteki yanına ve bedenin bir kısmından öteki kısmına. Daha derin bir seviyede hücrelerin içinde bu geribeslemeler, hammaddeleri uygun yerlere taşıyıp karmaşık hayat molekülleri kurmak için kullanan kimyasal ulaklar içerebilir. İnsan seviyesindeyse hemen hemen her rutin eylem, parmaklarımın bu cümleyi yazmak üzere bilgisayarın klavyesine vurmak için hareket edişi gibi, geribeslemeler içerir. Bunlarla beyin sürekli görme ve dokunma gibi duyulardan bilgi alıp bedenin davranışını düzenler (bu örnekte parmaklarım bir sonraki adımda nereye hareket edeceğini belirler).

Bu gerçekten bir geribesleme, yani iki yönlü bir işlemdir, sadece beynin parmakların nereye gideceğini söylediği bir talimat değil. Bütün sistem o parmakların şu anda nerede olduğunu, ne kadar hızla (ve ne yönde) hareket ettiğini, tuşların üzerindeki basıncın tam yeterli olup olmadığını kontrol etme, hata düzeltmek için ara sıra (benim durumumda sık sık!) geri gitme vs. işlerine dahildir. Bakmadan on parmak yazabilen bir daktilo bile böyle geribeslemelere cevaben parmaklarının tam hareketlerini sürekli ayarlar, kendinizi dik tutmak için dengenizde sürekli otomatik ayarlar yaparak bisiklet sürdüğünüzde olduğu gibi. Bu geribeslemeler hakkında hiçbir şey bilmeseydiniz ve bedenin farklı kısımlarının bir haberleşme sistemiyle birbirine bağlı olduğundan haberiniz olmasaydı, ellerinizin ucundaki uzamış et ve kemik yumrularının klavyeyi dürterek akıllı bir mesaj "yaratması" mucize gibi görünürdü – tıpkı, bir tür haberleşme ve geribesleme biçimini yardıma çağırmazsak, bir atomun zıt yönlerinden uçan iki fotonun kutuplanma durumlarının Aspect deneyinin ortaya koyduğu biçimde ilişkilendirilebilmesinin mucizevi görünmesi gibi. Bir büyük fark, üstesinden gelmemiz gereken zorluk, kuantum dünyasındaki geribeslemenin *anında* olmasıdır. Fakat bu da ışığın doğasıyla açıklanır, hem görelilik kuramı bağlamında hem de elektrodinamiğin kuantum doğasına ilişkin doğru perspektifle. Nispeten az bilinen bu perspektif elektromanyetik ışımanın Wheeler-Feynman modelidir – kütle çekiminin işleyişi konusunda da çarpıcı içgörüler sunan bir model.

Kütleden En İyi Şekilde Yararlanmak

Feynman'ın yarım yüzyılı aşkın zaman önceki o pek bilinmeyen içgörüsüne göre, elektromanyetik ışımanın davranışı ve yüklü parçacıklarla etkileşme biçimi, Maxwell denklemlerinin, yani elektromanyetik dalganın bir gölcüğün yüzeyinde hareket eden halka dalgacıklar gibi uzayda hareket etmesini tarif eden denklemlerin, iki grup çözümünün olduğu gerçeğini ciddiye alarak açıklanabilirdi. Çözüm gruplarından biri, "sağduyu" çözümleri, dalgaları hızlandırılmış yüklü bir parçacıktan dışarıya ve zamanda ileriye doğru hareket eden biçimde tarif eder, tıpkı gölcüğe atılan bir taşın suya düştüğü noktadan başlayarak yayılan halka dalgalar gibi. İkinci grup çözüm ise (bugün bile genellikle göz ardı edilir) dalgaları zamanda geriye hareket edip yüklü parçacıkların üzerinde birleşir biçimde tarif eder, tıpkı gölcüğün kenarlarından *başlayıp* gölcüğün ortasındaki bir noktada birleşen halka dalgalar gibi. İkinci Bölüm'de anlattığım gibi, evrendeki bütün yüklü parçacıklarla etkileşim içindeki iki grup dalga da uygun biçimde hesaba katılınca karmaşıklığın büyük kısmı birbirini yok eder ve bir yüklü parçacıktan ötekine elektromanyetik etkileri taşımak için geriye sadece bildik sağduyu dalgaları (ya da "gecikmiş" dalgalar) kalır. Fakat bütün bu etkileşimlerin sonucunda tek tek her bir yüklü parça –her bir elektron da dahil– evrendeki bütün öteki yüklü parçacıklara göre kendi konumunun *anında* farkındadır. Zamanda geriye yolculuk eden dalgaların ("ilerlemiş" dalgalar) somut etkilerinden biri, her yüklü parçacığı bütün elektromanyetik ağın bütünleşmiş bir parçası yapan bir geribesleme sağlamasıdır. Dünyadaki bir laboratuvarda bir elektronu dürterseniz, ilke olarak, mesela iki milyon ışık yılından daha uzaktaki Andromeda galaksisindeki her yüklü parçacık *hemen* ne olduğunu bilir, oysa dünyadaki bir elektronu dürtmenin yol açtığı herhangi bir gecikmiş dalganın Andromeda galaksisine ulaşması iki milyon yıldan çok sürecektir.

Wheeler-Feynman soğurma kuramının taraftarları bile bunu bu şekilde ifade etmeye gelince vazgeçiyorlar. Geleneksel versiyona göre (kuram hakkında herhangi bir şeyin geleneksel olduğu söylenebilirse tabii) dünyadaki elektronumuz Andromeda galaksisinde-

kiler de dahil başka herhangi bir yerdeki yüklü parçacıklarla ilintili olarak "nerede olduğunu bilir". Fakat geribeslemenin can alıcı özelliği iki yanlı da işlemesidir. Eğer *bizim* elektronumuz Andromeda galaksisinin nerede olduğunu bilirse o zaman elbette Andromeda galaksisi de bizim elektronumuzun nerede olduğunu bilir.

Geribeslemenin –elektronumuzu kendi başına değil evreni dolduran bütünsel elektromanyetik ağın bir parçası olarak görme gerekliliğinin– sonucu şudur ki, elektron uzaktaki galaksilerdeki bütün o yüklü parçacıkların etkisiyle, galaksiler arasında bilgi taşıyan hiçbir sinyal ışıktan daha hızlı yolculuk edemese de, bizim tarafımızdan itilip kakılmaya direnç gösterir.

Şimdi, yüklü parçacıkların neden ışıma direnciyle karşılaştığına dair bu açıklama, daha önce sözü edilen, fizikçilerin uzun süre başına bela olan başka bir bilmeceye çok benziyor. Neden sıradan kütle parçaları itilip kakılmaya direniş gösteriyor ve itildikleri zaman ne kadar direnç göstereceklerini nasıl biliyorlar? Eylemsizliğin kendisi nereden geliyor?

Galileo bir nesnenin üzerine uygulanan kuvvetlerin etkisini ortaya koyan şeyin o nesnenin hızı değil ivmesi olduğunu fark eden ilk kişi gibi görünüyor. Yerkürede sürtünme –o dış kuvvetlerden biri– daima mevcuttur ve siz itmeye devam etmediğiniz sürece hareket eden her nesneyi yavaşlatır (hızını keser). Sürtünme etkisi olmasaydı nesneler sonsuza dek düz bir doğruda hareket etmeye devam ederdi, tabii kuvvetlerle itilip çekilmedikleri sürece.

Bu, Newton'un mekanik yasalarının temel taşlarından biri olmuştur. Cisimler eğer dış kuvvetlerle hızlandırılmazsa, boş uzayda (mutlak bir eylemsizlik standardına göre) sabit bir hızla yol alır, diyordu Newton. Kütlesi belli bir nesnenin belli bir kuvvetle yaratılan ivmesi, kuvvetin kütleye bölünmesiyle bulunur.

Bu keşfin ilgi uyandıran bir yönü, hesaba katılan kütlenin kütle çekiminde yer alan kütleyle aynı olmasıdır. Bunun böyle olması gerektiği ilk etapta bariz değildir. Çekimsel kütle, bir nesnenin başka nesneleri çekmek için evrene uyguladığı kuvvetin büyüklüğünü belirler; eylemsizlik kütlesi adı verilen kütle bir nesnenin dış kuvvetler tarafından –sadece kütle çekimi değil *herhangi* bir dış kuvvet tarafından– itilmesine ve çekilmesine karşı verdiği tepkinin gücünü belirler. Bir nesnedeki "madde miktarı" hem dış dünya üze-

rindeki etkisini hem de dış dünyaya tepkisini belirler.[96] Geribesleme çoktan harekete geçmiş gibi görünüyor: her bir nesneyi evrene genel olarak bağlayan iki yönlü bir işlem. Fakat daha düne kadar kimsenin geribeslemenin nasıl işlediği hakkında net bir fikri yoktu.

Newton'un kendisi evrende gerçekten tercih edilmiş bir referans çerçevesi olduğunu gösteriyor gibi görünen hoş bir deney tarif etmişti, daha sonra filozoflar bu deneyin tam da mutlak eylemsizlik standardını tanımlayan şeyi gösterdiğini söylediler. Newton 1686' da *İlkeler*'de uzun bir ipin ucuna su dolu bir kova asıp ipi iyice burduktan sonra bıraktığınızda neler olacağını açıklıyordu. Tabii burulmuş ip boşalırken kova da dönmeye başlayacaktır. Önce kovadaki suyun yüzeyi aynı seviyede kalacaktır, fakat sürtünme kovanın dönüşünü suya aktarmaya başladıkça su da dönmeye başlar ve "merkezkaç kuvveti" suyu kovanın kenarlarına ittikçe suyun yüzeyi içbükey şeklini alır. Dönmesini durdurmak için kovayı tutarsanız su dönmeye devam eder, içbükey bir yüzeyle, fakat gittikçe yavaşlar, yüzeyi gittikçe düzelir ve sonra durunca yüzeyi dümdüz bir şekil alır.

Newton'a göre dönen suyun yüzeyinin içbükey şekli, suyun döndüğünü "bildiği"ni gösteriyordu. Fakat neye göre dönüyor? Kovanın ve suyun göreli hareketleri tamamen önemsiz görünüyor. Eğer hem kova hem de su hiçbir göreli hareket olmaksızın durgunsa, su düzdür; eğer kova dönüyor ama su duruyorsa, kovayla su arasında göreli bir hareket olmasına rağmen yüzey yine düzdür; eğer su dönüyor ama kova duruyorsa, ikisi arasında göreli hareket vardır ve yüzey içbükeydir; fakat hem kova hem su dönüyorsa, dolayısıyla aralarında yine göreli bir hareket yoksa yüzey içbükeydir. İşte bunun üzerine Newton suyun mutlak uzaya göre dönüp dönmediğini "bildiği" sonucuna varmıştır.

On sekizinci yüzyılda filozof George Berkeley başka bir açıklamada bulunmuştu. Bütün hareketin elle tutulur bir şeye göre öl-

96. Bir nesnenin ağırlığının ayda dünyadakinden daha az olması kafanızı karıştırmasın; bunun nedeni nesnenin değişmesi değil, ay yüzeyindeki kütle çekim kuvvetinin dünya yüzeyindeki kütle çekim kuvvetinden az olmasıdır. Ayda az olan dış kuvvettir, nesnenin eylemsizlik kütlesi de o düşük dış kuvvetle eşleşir, böylece "daha hafif" olur.

çülmesi gerektiğini ileri sürüyor ve ünlü kova deneyinde önemli görünen şeyin suyun o sırada bilinen en uzaktaki nesnelere, sabit yıldızlara göre nasıl hareket ettiği olduğunu söylüyordu. Tabii biz şimdi kozmosta yıldızların bize nispeten yakın komşular olduğunu ve Samanyolu'nun ötesinde milyonlarca başka galaksi bulunduğunu biliyoruz. Fakat Berkeley'nin kavrayışı hâlâ geçerli. Bir kova suyun yüzeyi eğer uzaktaki galaksilere göre dönmezse düz olur ve uzaktaki galaksilere göre dönerse çukurlaşır. Ayrıca, ivme de uzaktaki galaksilere göre ölçülüyor gibidir – yani evrendeki bütün maddenin ortalama dağılımına göre. Adeta, siz bir şeyi sağa sola ittiğinizde evrendeki bütün maddelere göre durumunu hesaplar ve ona göre tepki verir. Bir şekilde kütle çekimiyle yerinde tutulur, çekimsel ve eylemsizlik kütlelerinin aynı olmasının sebebi de budur.

Eylemsizliğin bütün evrene karşı maddi bir nesnenin tepkisiyle üretildiği fikri genellikle 19. yüzyılda yaşamış Avusturyalı fizikçi Ernst Mach'a istinaden Mach ilkesi olarak bilinir. Mach ismi hızları ses hızına göre ölçmekte kullanılan sayıyla ölümsüzleşmiştir, fakat kendisi eylemsizliğin doğası hakkında da uzun uzun kafa yormuştur.

Daha önce sözünü ettiğim gibi, temelde Berkeley'nin fikirlerinin bir uzantısı olan Mach'ın fikirleri Einstein'ı büyük ölçüde etkilemiştir. Einstein çekimsel kütleyle eylemsizlik kütlesinin özdeşliğinin aslında eylemsizlik kuvvetlerinin köken itibariyle kütle çekimsel olmalarından kaynaklandığını ileri sürüp Mach ilkesini –bütün evrenin herhangi bir çekimsel kütle üzerindeki geribeslemesi– kendi genel görelilik kuramına katmaya çalışmıştır. Bu doğrultuda naif bir argüman yürütmek kolay sayılır. Bütün uzak galaksilerdeki (ve başka her şeydeki) bütün madde, dünyadaki (ve başka her yerdeki) bütün her şeye (mesela masamda duran bir yığın bilgisayar diski de dahil) tutunmak için çekimsel bir etkiyle uzanır. Bu disklerden birini kıpırdatmaya çalıştığımda bu iş için ortaya koymam gereken çaba miktarı, evrenin o diski elinde ne kadar güçlü tuttuğunun ölçüsüdür.

Fakat bütün bunları güvenli bilimsel bir temele oturtmak çok daha zordur. Disk benim onu kıpırdatma gayretlerime ne kadar karşı koyacağını anında nasıl "bilir"? Cazip bir olasılık (naif tabloda), bir nesneyi dürtüp konumunu değiştirerek onun evrene bazı kütle

çekimsel halkacıklar yaymasına sebep olmamızdır, bu halkacıklar evrendeki her şeyi rahatsız eder, öyle ki bir tür yankı gelir, rahatsız edilmiş nesne üzerinde odaklanıp onun mevcut halinde kalmasını sağlamaya çalışır. Kütle çekimsel halkalar da dahil sinyaller ancak ışık hızında yol alabiliyorsa, o zaman yankının geri dönmesi ve diskin itilmeye karşı nasıl tepki vermesi gerektiğine karar vermesi neredeyse sonsuza dek sürer.

Tabii zaman simetrili Wheeler-Feynman soğurma kuramı ilkesini kütle çekimi tanımına dahil edip bu geribeslemedeki kütle çekimsel halkaların bir kısmının zamanda geriye yolculuk yapmasına izin verirseniz iş değişir. Fakat Wheeler-Feynman elektromanyetik ışıma kuramı Einstein'ın kütle çekim kuramından 30 yıl kadar sonra geldiğinden ve o zaman bile kimse pek ciddiye almadığından Mach ilkesiyle ortaya konan bu bilmecenin çözümü doğru bir matematik temeline oturmak için uzun zaman beklemek zorunda kaldı.

Einstein genel kuramını bulduğundan beri Mach ilkesini tatminkâr bir biçimde içerip içermediği tartışılıp durdu. Genel kuram en azından bir yere kadar Mach ilkesini dahil etmeye doğru gider, çünkü uzayda herhangi bir yerdeki bir nesnenin davranışı o yerdeki uzay-zamanın bükümüne bağlıdır, bu da evrendeki bütün maddenin toplam kütle çekimsel etkisiyle belirlenir. Ama yine de uzay-zaman bükülmesini belirleyen "sinyaller"in bir yerden bir yere ne kadar çabuk gittiği sorusunu hâlâ cevaplamaz. O uzaktaki galaksilerin kendileri de hareket ettiği için etkilerinin sürekli değişiyor olması gerekir. Bu değişiklikler sadece ışık hızıyla mı yayılır yoksa anında mı? Eğer anındaysa, nasıl?

Bu tartışmanın ilginç mi ilginç yanlarından biri şudur ki, Einstein'ın denklemleri ancak, evrende uzay-zamanı tekrar kendi üstüne kütle çekimsel olarak bükmek için yeterli madde varsa doğru türde Mach etkileri üretir. Her yönde sonsuza dek uzanan "açık" bir evrende denklemler sonlu miktardaki eylemsizlikle dengeli hale getirilemez. Bu eskiden genel görelilik kuramının Mach ilkesini içine aldığı iddiasına karşı söylenen bir argümandı, zira insanlar evrenin "açık" olduğunu düşünüyorlardı; fakat İkinci Bölüm'de gördüğümüz gibi bütün bunlar değişti, artık evrenin "kapalı" olduğuna dair karşı konulmaz kanıtlar var gibi görünüyor. Bu da tabii Wheeler-Feynman soğurma kuramının kendisinin şimdi daha çok ciddiye

alınmasının sebeplerinden biri.

1993'te Kaliforniya Üniversitesi'nden Şu-Yuan Çu rüzgârın şimdi hangi yönde estiğini gösteren bir makale yayımladı.[97] Çu, Wheeler-Feynman kuramı çeşitlemesi bağlamında Bell eşitsizliğine bakıyordu, ben de ona yazarak başka neler üzerinde çalıştığını sordum. Başka şeylerin yanı sıra, kütle çekimi mevcutken nasıl kuantum mekaniği yapılacağına ilişkin bir araştırma yapıyordu. Bu çalışma parçacık fiziğindeki en son fikirlerin bazılarını zaman simetrili Wheeler-Feynman modeli ile güzel bir biçimde birleştirip kütle çekiminin kendisinin nereden geldiğini göstermenin yanı sıra eylemsizliği de açıklıyordu. Bu kitabın yazıldığı sırada (Mart 1994) Çu' nun çalışması sadece Kaliforniya Üniversitesi prova baskısı olarak mevcut, sayı UCR-HEP-T117; halihazırdaki araştırmalar hakkında olabildiğince çok bilgi sunuyor ve derli toplu bir paket içine o kadar çok fikir sığdırmış ki bahsetmeden geçmek olmaz.

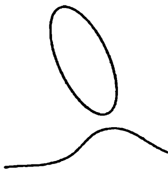
Kütle Çekimini İpe Dizmek

Önce hikâyenin parçacık fiziği yanını açıklamak için minik bir sapma yapacağım. 1990'larda parçacık fizikçileri artık maddenin elektron ve kuark gibi parçacık seviyesindeki en iç kısımlarına yolculuk etmekten geri durmuyorlar. "Temel" parçacıkları ayırıp içlerinde ne olduğuna bakmaya yönelik tarihsel sürecin bir tekrarı olarak, 1980' lerin ortalarında kuark ve elektron gibi parçacıkların özelliklerinin, bu parçacıkların sicim adı verilen çok daha küçük varlıklardan oluşmuş olmaları halinde açıklanabileceği keşfedildi ve bazı fizikçiler bu keşiften çok etkilendi.

İsimlerinden de anlaşılacağı gibi bu "yeni" varlıklar başka parçacıkların bildik bilardo topu modellerinden, bir uzunluğa sahip olmalarıyla ayrılırlar – bir yöndeki bir uzantı, kelimenin tam anlamıyla minik bir sicim parçası gibi.

"Minik" burada anahtar kelime. Tipik bir sicim bir metrenin 10^{-35}'i uzunluğunda olacaktır, öyle ki bu sicimlerden 10^{20} tanesi uç uca dizilince bir protonun çapına ulaşır. Böyle sicimlerin var oldu-

97. *Physical Review Letters* 71 (1993), s. 2847.



25 Sicimler iki çeşit halinde bulunur – kapalı halka ya da açık uç.

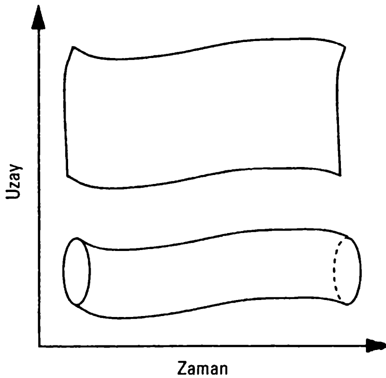
ğuna dair doğrudan hiçbir deneysel kanıt yok. Bu ölçekteki etkileşimleri araştıracak deneyler dünyada yapılabilecek en üstün parçacık hızlandırıcının sağlayabileceğinden çok daha fazla enerji gerektirirdi. Fakat onların varlığına dair bu ihtimal, parçacık dünyasının etkileşimlerinin işleyişine dair sağlam bir kurama dayanmaktadır. Kısmen "her şeyin kuramı"na yönelik arketipsel KED ve KKD yaklaşımlarından türetilmiştir.

Şimdi, parçacık dünyası hakkında hiçbir kuramımızın ve modelimizin "hakikat"i vermediğini ileri sürmüş ve hepsinin anlayabileceğimiz bir tablo ve tahminlerde bulunabileceğimiz modeller sunmakta hemen hemen başarılı olduklarını ifade etmiştim. Bu bakımdan sicim kuramı gerçekten çok başarılı. Hiç kimse bir sicim görmemiş ya da belli bir parçacık hızlandırıcısı deneyinde bir tane bile tespit etmemiş de olsa, yük gibi özellikler sicimlerin uçlarına "bağlanmış" gibi açıklanabilir, parçacık etkileşimleri de sicimlerin çarpışmaları ve birleşmeleri ya da ayrılmaları biçiminde açıklanabilir. Hatta, minik ambalaj lastiğine benzer şekilde titreşen, uçları kapalı halka sicimlerin graviton olarak –fotonların elektromanyetik kuvveti taşıması gibi kütle çekimsel kuvveti taşıyan parçacıklar– davranması için gereken özelliklere otomatik olarak sahip oldukları ortaya çıkmıştır. Bütün paket kendisiyle tutarlı, mantıklı ve (matematik ustaları için) dünyanın nasıl işlediğini bütün diğer paketler kadar iyi tarif eden bir açıklamadır. Tek zaafı, Newton'un nihai deneysel testine tabi tutmanın henüz bir yolunun olmamasıdır. Fakat bu, evrenin zaten bilinen özelliklerini kuram yoluyla açıklamaya çalışan kuramcılara engel olmamıştır – Çu'nun yaptığı da işte tam buydu.

Çu'nun kütle çekimi araştırması, Wheeler-Feynman yaklaşımına dayalı zaman simetrili tariflerin yardımıyla bu seviyedeki etkileşimleri açıklamaya yönelik daha büyük bir girişimin bir parçasıydı. Bu işlem bağımsız bir varlık olarak "alan" fikrini ortadan kaldı-

rır (örneğin, elektromanyetik ve kütle çekimsel alan). Parçacıklar birbirleriyle zaman simetrili bir biçimde etkileşirler, süreğen bir geribesleme aracılığıyla ilerlemiş ve gecikmiş "mesaj" alışverişinde bulunurlar; kütle çekimi gibi, süreğen alan olarak düşünmeye alışkın olduğumuz şey, küçük madde parçacıklarını içeren bütün etkileşimlerin ortalaması üzerinden kurulmuştur. Süreğen kütle çekimsel alan, işin içindeki parçacıkların ölçeğine göre büyük olan bir ölçekteki bu ortalama işleminden çıkar – ama bu parçacıklar ancak 10^{20} tane olunca bir protonun çapına ulaşacak kadar küçük sicim parçalarıysa, o zaman bunun anlamı bir proton ölçeğinde bile kütle çekiminin çok düzgün ve süreğen görüneceğidir. "Uzay-zaman bükümü," der Çu, "sicimlerin dünya tabakalarından örülmüş 'hareket gobleni'nin desenlerinin bir yansımasından ibarettir".

Bu yaklaşımın içerimlerinden biri, parçacık hareketinin Newtoncu, klasik yörünge cinsinden tanımının parçacıkların davranışı hakkındaki bir tür istatistik ortalamadan çıktığıdır. "Sicimler parçacıkvari yolları etrafında küçük ölçekli titreşimler meydana getirir ... biz güçlü titreşimlerin ortalamasını aldıktan sonra." Bunda parçacık dünyasını anlamaya yönelik hem Feynman'ın yol integrali (geçmişler-toplamı) yaklaşımının hem de Ilya Prigogine'nin termodinamikten geliştirdiği istatistiksel yaklaşımının izleri vardır. Burası tüm

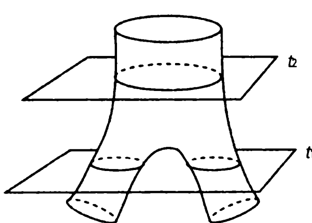


26 Uçları açık sicimler uzay-zamanda yol kat ettiğinde "dünya tabakaları" *yayarlar*, kapalı halka sicimler uzay-zamanda yol kat ettiğinde "dünya tüpleri" *yayarlar*.

ayrıntılara girmek için uygun değil –ayrıntılar bu büyüklükte başka bir kitabı doldurabilir– ama hem Prigogine hem de Çu, istatistiğin önce geldiği gerçeklik tariflerinde bulunmuşlardır, klasik parçacık yörüngeleri istatistiklerden çıkar. Hem klasik dünyada hem de kuantum dünyasında, Çu'nun sözleriyle "mekaniğin temeli istatistiğin üzerine kurulmuş gibi görünüyor ... mekaniği istatistikten türetmek gerekir, tersi olmaz."

Termodinamikle olan bağlantı açıkça ortada. Termodinamikteki anahtar kavram entropidir: bir sistemin dengeye ne kadar yakın olduğunu ölçen bir özellik. Çu'nun tarifi Einstein'ın hareket denkleminin maksimum entropi denge şartında parçacık yörüngelerinin doğru tarifi olduğunu gösteriyor. Ama Wheeler-Feynman kuramının ilk halinde (ve Mach ilkesini genel görelilik kuramına dahil etme teşebbüslerinde) olduğu gibi, sicimlerden gelen bütün ışımanın bugünden geleceğe tamamen soğurulması gerekir – başka bir deyişle evrenin kapalı olması gerekir. Çu 1993'ün sonunda bana gönderdiği mektuptaki derli toplu özette, varmış olduğu sonuçları dile getiriyordu: "Klasik mekanik denge durumunu tarif eder (bu nedenle klasik mekanikte olasılılığa ilişkin hiçbir ifade yoktur); kuantum mekaniği, dalgalanmaları tarif eder; yol integrali biçimciliği de sistemdeki muazzam sayıdaki sicimlerin toplamını almaktan gelir."

Son yılların evrenbilim tartışmalarını takip etmiş olanlar için bir ikramiye bile var. Einstein'ın evren tarifi, genel görelilik kuramının denklemleri, evren sabiti adı verilen bir sayı içerir, ki bu durum 70 yıldan daha uzun bir süredir astronomların ayıbı olmuştur. Bu sayının değerini Einstein'ın denkleminden tahmin etmenin hiçbir yolu yoktur ve görünüşe göre herhangi bir değer olabilir. Ne var ki bütün evrenin genişleme tarzının gözlemleri bunun sıfıra çok ama çok ya-



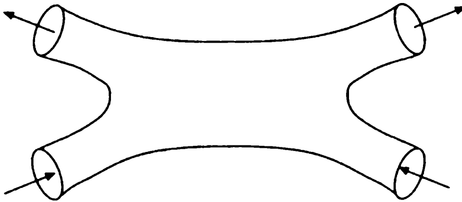
Zaman

27 Uzay-zamanda hareket eden ve birbirleriyle birleşen sicim halkaları uzay-zaman pantolonu oluşturur.

kın olması gerektiğini koyuyor ortaya. Çok küçük bir evren sabiti bile evrenin görülen genişleme biçimine derin bir etkide bulanabilir. Fakat Çu'nun kütle çekimi tarifi, Einstein'ın bir parça sicimin uzunluğundan çok daha büyük mesafeler için yaptığı tarifle tamamen aynı olmasına rağmen evren sabitine ilişkin hiçbir terim içermiyor.

Tekrar Bell eşitsizliğine dönersek, sorun deneylerin ayrılmış parçacıkların arasında anında ilintiler olduğunu göstermesidir. Fakat Çu'nun *Physical Review Letters*'daki makalesinde belirttiği gibi: "Uzamsal olarak ayrılmış iki parçacık arasındaki anında bağıntı, üçüncü bir parçacık aracılığıyla kurulabilir. Bu üçüncü parçacık, iki parçacıktan biriyle ilerlemiş etkileşimle, diğeriyle de gecikmiş etkileşimle bağıntı kurar."

Çu'yu sicim kuramını kullanarak Wheeler-Feynman yaklaşımını önce kuantum mekaniği tarifine, sonra da kütle çekimi tarifine dahil etme çabalarına iten şey buydu. O sırada farkına varmadığı şey ise böyle bir yaklaşımın felsefi temellerinin Seattle Washington Üniversitesi'nden John Cramer tarafından 1980'lerde basılmış ama adı pek duyulmamış bir dizi makalede çoktan ortaya konmuş olmasıydı. Cramer'ın kuantum mekaniğinin "işlem yorumu" aynen bu yaklaşımı kullanır ve Çu'nun benzer fikirleri sicim kuramı ve kütle çekimine uygulamasındaki başarı bunun yakın gelecekte fiziğin verimli bir alanı olacağını gösteriyor. Cramer'in çalışmasından kendisine söz ettiğimde Çu şöyle söylemişti: "Bu tartışmalarda ilerlemiş etkileşimlerin bir olasılık olarak kabul edildiğini bilseydim, Whe-



28 Sicim kuramı bağlamında iki parçacığın arasındaki etkileşim dünya tüplerinin birleşmesi ve ayrılması biçiminde yeniden yorumlanıyor. Bu tür bir şema pek çok sicim halkayı içerecek biçimde daha da karmaşık hale getirilebilir, tıpkı bir elektronun manyetik momentinin hesaplanmasında ortaya çıkan karmaşıklıklar gibi.

eler-Feynman'ın zaman simetrili elektrodinamiğinin sicim kuramı genellemesini takip ederkenki kaygım kesinlikle azalırdı."

O zaman bu tür kaygıları bir kenara atmaya hazırlanın – zira işte karşınızda dünyanın kuantum seviyesinde nasıl işlediğinin her bakımdan en iyi tablosunu sunan yorum. Bell eşitsizliğinin, Aspect deneyinin ve Schrödinger'in yavru kedilerinin kaderinin ortaya koyduğu muammalara tek "cevap" arayan herkes için.

Karmaşıklığın Basit Yüzü

Wheeler-Feynman kuramının ilk versiyonu, işin doğrusu, klasik bir kuramdı, çünkü kuantum süreçlerini hesaba katmıyordu. Ne var ki, 1960'lara gelindiğinde araştırmacılar aslında üst üste binen ve etkileşen, bir kısmı zamanda ileri, bir kısmıysa geri giden dalgaların karmaşıklığından kaynaklanan iki kararlı durum olduğunu bulmuşlardı. Böyle bir sisteme ya gecikmiş ışıma (bizim evrenimiz gibi) ya da ilerlemiş ışıma (zamanın geriye aktığı bir evrenin dengi) hâkim olmalıydı. 1970'lerin başlarında evrende neden bir zaman oku olması gerektiği üzerinde kafa yoran birkaç evrenbilimci, kuantum mekaniğini benimseyen Wheeler-Feynman kuramı üzerinde çeşitlemeler geliştirdi. Sonuç olarak KED'in Wheeler-Feynman versiyonlarını ortaya koydular. Fred Hoyle ve Jayant Narlikar bir yol integrali tekniği, Paul Davies de S-matris kuramı denilen alternatif bir matematiksel yaklaşım kullandı. İşin matematik kısmı önemli değil; önemli olan her iki durumda da Wheeler-Feynman soğurma kuramının tam tekmil bir kuantum mekaniği modeline dönüştürülebileceğini bulmuş olmaları.

Evrenbilimcilerin bütün bunlarla ilgilenmesinin nedeni şu iddiaya dayanır (ki hâlâ sadece bir iddiadan ibarettir bu): Evrenimizde gecikmiş dalgaların hâkim olması ve dolayısıyla belli bir zaman okunun var olması gerekliliği, geçmişte Büyük Patlama ve (muhtemelen) gelecekte nihai bir Büyük Çöküş'le evrenin kendisinin zaman asimetrisi göstermesiyle ilgilidir. Wheeler-Feynman kuramı parçacıklara evrenin geçmiş ve gelecek durumlarını "bilmeleri" için şimdi ve burada bir yol sağlar – gecikmiş dalgaların hâkim olmasını sağlayan bu "sınır koşulları" olabilir.

Fakat bunların hepsi yine sadece elektromanyetik ışımaya uygulanıyordu. John Cramer'ın attığı dev adım bu fikirleri kuantum mekaniğinin dalga denklemlerine –Schrödinger denkleminin kendisine ve fotonlar gibi ışık hızında yol alan olasılık dalgalarını tarif eden denklemlere– kadar genişletmekti. Vardığı sonuçları 1986'da yayımlanan çok teferruatlı bir makalede açıkladı,[98] fakat bu makale çok az ses getirdi; mesela Çu 1993'te sicim kuramına dayalı fikirlerini geliştirirken Cramer'ın yorumunu hiç duymamıştı.

Soğurma kuramı fikirlerini kuantum mekaniğine uyarlamak için Maxwell denklemleri gibi biri geleceğe akan pozitif enerji dalgasının eşdeğeri olan, öteki ise geçmişe akan negatif enerji dalgasını tarif eden bir denklem gerekiyor. İlk bakışta Schrödinger'in ünlü dalga denklemi amaca uymuyor, çünkü sadece tek bir yöndeki akışı tarif ediyor, biz de (tabii) bunu geçmişten geleceğe diye yorumluyoruz. Fakat bütün fizikçilerin üniversitede öğrendikleri (ve çabucak unuttukları) gibi bu denklemin en yaygın kullanılan versiyonu aslında eksik bir versiyon. Kuantum öncülerinin kendilerinin de fark ettiği gibi, görelilik kuramının gerekliliklerini hesaba katmıyor. Pek çok durumda bunun önemi yok. Fizik öğrencilerinin ve hatta kuantum mekaniğiyle uğraşan pek çok insanın bu denklemin basit versiyonunu güle oynaya kullanmasının sebebi de bu. Fakat dalga denkleminin tam versiyonu, göreci etkilere de uygun biçimde yer vermesiyle adeta Maxwell denklemleri gibidir. Bu versiyonun iki grup çözümü vardır – bir tanesi bildik basit Schrödinger denklemine karşılık gelir, öteki de geçmişe negatif enerji akışını tanımlayan Schrödinger denkleminin adeta aynadaki sureti gibidir.

Bu ikilik en açık biçimde kuantum mekaniği bağlamındaki olasılık hesaplarında kendini gösterir. Bir kuantum sisteminin özellikleri, bazen "durum vektörü" diye de bilinen (esasen dalga fonksiyonuna karşılık gelen) matematiksel bir ifadeyle tarif edilir. Bu ifade bir kuantum varlığının durumu –konumu, "momentum"u, enerjisi ve sistemin (ki bu sadece bir elektron dalga paketi de olabilir) öteki özellikleri– hakkında bilgi içerir. Genel olarak, bu durum vektörü hem normal ("gerçek") sayıların hem de sanal sayıların (-

98. "Kuantum mekaniğinin işlem yorumu", *Reviews of Modern Physics* 58 (1986), s. 647.

1'in karekökü *i*'yi içeren sayılar) bir karışımını kapsar. Böyle bir karışıma malum sebeplerden karmaşık değişken denir; gerçek kısım artı (ya da eksi) sanal kısım şeklinde yazılır. Bir elektronun belli bir yerde belli bir zamanda bulunma şansını çözmek için gereken olasılık hesapları aslında elektronun o belli durumuna karşılık gelen durum vektörünün karesini almaya bağlıdır. Fakat bir karmaşık değişkenin karesini almak onu kendisiyle çarpmaktan ibaret değildir. Onun yerine, sanal kısmın önündeki işareti değiştirerek başka bir değişken, karmaşık eşlenik adı verilen ve ilkinin aynadaki sureti olan bir değişken elde etmeniz gerekir: Eğer (+) idiyse (–) olur, ya da tersi. Bu iki karmaşık sayı sonra birbiriyle çarpılarak olasılık bulunur. Fakat bir sistemin zamanla nasıl değiştiğini tarif eden denklemler için, sanal kısmın önündeki işareti değiştirme ve karmaşık eşleniği bulma işlemi zamanın yönünü ters çevirmeye denktir! Max Born'un 1926' da geliştirdiği bu basit olasılık denklemi zamanın doğasına ve biri ilerlemiş dalgaları, öteki gecikmiş dalgaları tarif eden iki tür Schrödinger denklemi ihtimaline açık bir göndermede bulunur. Bütün bunlardan sonra kuantum mekaniğinin dalga denkleminin tamamen göreci versiyonunun iki grup çözümü tam da bu karmaşık eşleniklerdir, dersem muhtemelen pek şaşırmazsınız. Fakat köklü gelenekte 70 yıl kadar pek çok fizikçi bu iki grup çözümden birini, zamanda geriye giden dalgalar hakkında konuşmak "bariz biçimde" anlamsız olduğundan büyük ölçüde göz ardı etmiştir!

Buradan çıkan kayda değer sonuç şu ki, 1926'dan beri, bir fizikçi ne zaman basit Schrödinger denkleminin karmaşık eşleniğini alıp bu denklemle birleştirerek bir kuantum olasılığını hesaplasa, bilmeden denklemlerin ilerlemiş dalga çözümünü ve zamanda geriye yolculuk eden dalgaların etkisini hesaba katmış demektir. Cramer'ın kuantum mekaniği yorumundaki matematikte hiçbir sorun yok, çünkü buradaki matematik, ta Schrödinger denklemine kadar, standart Kopenhag Yorumu'ndaki matematikle tamamen aynı. Fark sadece yorumda. Cramer'ın 1986 tarihli makalesinde (s. 660) belirttiği gibi, "alan, fiili olarak uzaktan etki süreçlerini tarif etmede matematiksel bir kolaylık sağlamış olur". Bu Çu'nun yedi yıl sonra ondan habersiz olarak vardığı görüşle aynı. O halde, bu yaklaşımın makul olduğuna sizi ikna ettiğimi umarak kuantum dünyasının ba-

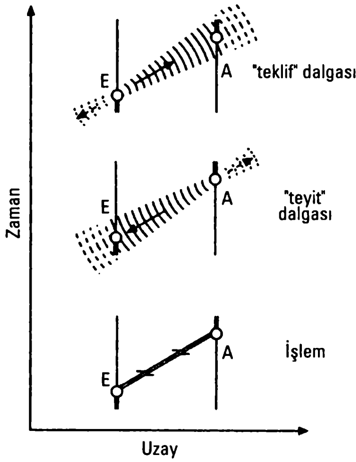
zı muammalarını ve paradokslarını nasıl açıkladığına bir göz atmayı öneriyorum.

Evrenle El Sıkışmak

Cramer'ın tipik bir kuantum "işlem"ini tarif edişi bir parçacığın uzay ve zamanda başka bir yerde başka bir parçacıkla "el sıkışması" şeklindedir. Bunu bir elektronun başka bir elektron tarafından emilen elektromanyetik ışıma yayması olarak düşünebilirsiniz. Bu tarif, bir durumda başlayan bir kuantum varlığının durum vektörünün bir etkileşim sonucunda başka bir durumda son bulması için de gayet iyi işler – örneğin iki delik deneyinin bir ucundaki kaynaktan yayılan ve deneyin öteki ucundaki bir detektör tarafından soğrulan bir parçacığın durum vektörü. Gündelik dille yapılan bunun gibi bütün tariflerdeki güçlüklerden biri, zamanda aynı anda iki yöne birden giden ve dolayısıyla da gündelik hayattaki saatlere göre aynı anda meydana gelen etkileşimlerin nasıl ele alınacağıdır. Cramer zamanın dışında durup bir tür sahte zamana başvuran bir semantik araç kullanarak bunu gayet etkin biçimde başarır. Semantik bir araçtan başka bir şey değildir bu – ama kesinlikle karşımızdaki tabloyu netleştirir.

Bu şu şekilde işler: Bu tabloda bir elektron titreştiğinde, geleceğe yayılan gecikmiş dalga ile geçmişe yayılan ilerlemiş dalganın zaman simetrili bir karışımı olan bir alan yayarak ışımaya teşebbüs eder. Neler olup bittiğini hayal etmenin ilk adımı olarak ilerlemiş dalgayı göz ardı edip gecikmiş dalgayı takip edin. Gecikmiş dalga, alan tarafından taşınan enerjiyi soğurabilen bir elektronla karşılaşana kadar geleceğe doğru devam eder. Soğurma süreci, soğurmayı yapan elektronun titreştirilmesini içerir ve bu titreşme ilk gecikmiş alanı iptal eden yeni bir gecikmiş alan yaratır. Böylece, soğurucunun geleceğinde net etki hiçbir gecikmiş alan kalmamasıdır.

Fakat soğurucu ayrıca, zamanda geriye, orijinal gecikmiş dalganın izinden yayıcıya giden negatif enerjili bir ilerlemiş dalga da üretir. Yayıcıda bu ilerlemiş dalga soğurulur, orijinal elektron ikinci bir ilerlemiş dalgayı geçmişe ışıyacak şekilde geri çekilir. Bu "yeni" ilerlemiş dalga "orijinal" ilerlemiş dalgayı iptal eder, böyle-



29 John Cramer'ın kuantum mekaniğinin "işlem yorumu" bu şemayla özetlenmiş durumda. Yukarıdan aşağıya doğru inersek, bir Y yayıcısı geleceğe ve geçmişe (yukarısı) bir "teklif dalgası" gönderir. Bunu alan bir S soğurucusu zamanda geriye, yayıcıya ve geleceğe (orta) yankılanan bir "teyit dalgası" gönderir. Teklif dalgası ve teyit dalgası, soğurucu ile yayıcı arasındaki dolambaçsız yol hariç evrendeki her yerde birbirini yok eder. Bu doğrudan bağlantı yolunda da bu dalgalar birbirini güçlendirerek bir kuantum işlemi gerçekleştirirler (aşağıda). Bütün kuantum gizemlerini açıklamak için anlamanız gereken tek şey bu şemadır. Çağımızın miti budur.

ce orijinal yayımın meydana geldiği andan önce geçmişe giden etkin bir ışıma yoktur. Geriye tek kalan, yayıcıyı ve soğurucuyu birleştiren bir çift dalgadır. Yarısı geleceğe pozitif enerji taşıyan gecikmiş dalgadan, yarısı da geçmişe (negatif zaman yönüne) negatif enerji taşıyan ilerlemiş dalgadan oluşur. İki negatif bir pozitif ettiğinden, bu ilerlemiş dalga sanki kendisi de yayıcıdan soğurucuya yolculuk eden gecikmiş bir dalga gibi orijinal gecikmiş dalgaya eklenir.[99]

Cramer'ın sözleriyle: "Yayıcının soğurucuya giden bir 'teklif' dalgası ürettiği düşünülebilir. O zaman soğurucu da yayıcıya bir 'teyit' dalgası gönderir ve işlem uzay-zamanda bir 'el sıkışması'yla tamamlanır."[100] Fakat bu sadece sahte zaman bakış açısından bir ardıllıktır. Gerçekte bu süreç zamandışıdır; hepsi bir anda olur. Bunun sebebi ışık hızıyla yolculuk eden sinyallerin yolculuğu tamam-

99. Bütün bu argüman "soğurucu" elektronun geçmişe ışıma yaymasıyla başlarsanız da gayet geçerlidir; işlem yorumu hangi zaman yönünün benimsenmesi gerektiği hakkında hiçbir şey söylemez, ama bunun evrenin sınır şartlarına bağlı olduğunu ima eder. O da Büyük Patlama'dan uzağa doğru bir zaman okundan yanadır.

100. "İşlem yorumu", s. 661.

lamasının hiç zaman almamasıdır – yani, ışık sinyalleri için evrendeki her nokta evrendeki her noktanın kapı komşusudur. Sinyallerin zamanda ileri mi yoksa geri mi hareket ettiğinin önemi yoktur zira bu onların (kendi referans çerçevelerinde) sıfır zamanını alır ve +0 ile -0 aynıdır.

Bu durum üç boyutta daha karmaşıktır, fakat sonuçlar tamamen aynıdır. En uçtaki bir örneği alırsak, sadece tek bir elektronu olan bir evrende, elektronun ışıması mümkün olmazdı (ne de, Mach ilkesi doğruysa, kütlesi olurdu). Eğer evrende bir başka elektron daha olsaydı, ilk elektron ışıyabilirdi, ama sadece bu ikinci "soğurucu" elektronun yönünde. Gerçek evrende, madde en büyük ölçeklerde dengeli olarak dağıtılmamış olsaydı ve bazı yönlerde öteki yönlerden daha az soğurma potansiyeli olsaydı, yayıcıların (mesela radyo antenlerinin) her yönde eşit güçte yayılmayı "reddedeceklerini" keşfederdik. Bu ihtimal gerçekten evrende farklı yönlere mikrodalga ışınları gönderilerek test edilmiş, fakat elektronların belli bir yönde yayılmaya isteksiz davranmalarıyla ilgili hiçbir işarete rastlanmamıştır.

Cramer kendi yorumunun, geleneksel kuantum mekaniğinden farklı tahminler içermediğini vurguluyor. Ona göre bu, insanların kuantum dünyasında neler olup bittiğini sarih olarak düşünmelerine yardımcı olabilecek kavramsal bir model, özellikle öğretim alanında yararlı olabilecek bir araç, normalde gizemli olarak görülen kuantum fenomenlerine dair sezgi ve kavrayışları geliştirmede son derece faydalı bir yorum. Fakat sırf bir model diye işlem yorumunun diğer yorumlarla kıyaslandığında zayıf kaldığını düşünmeye gerek yok, çünkü daha önce de gördüğümüz gibi, hiçbiri kuantum fenomenlerini anlamamıza yardımcı olmak için tasarlanmış kavramsal birer model olmaktan öteye geçmiyor, hepsi de aynı tahminlerde bulunuyor. Bir yorumu başka bir yoruma tercih etmede geçerli *tek* ölçüt bu gizemleri düşünmemizde bize ne kadar yardımcı olduğudur – ki bunda da Cramer'ın yorumu gözü kapalı galip gelir.

Bir kere, sadece neden bir zaman oku olduğu konusunda ipucu vermekle kalmıyor, bütün fiziksel süreçleri de aynı temele oturtuyor. Gözlemciye (akıllı veya değil) ya da ölçüm aygıtına özel bir statü vermeye gerek kalmıyor. Kuantum mekaniğinin anlamına ilişkin yarım asrı aşkın süredir devam etmekte olan felsefi tartışmanın

zeminini bir çırpıda büyük ölçüde ortadan kaldırıyor. Ve gözlemcinin rolü tartışmasının ötesine geçen işlem yorumu gerçekten o klasik kuantum gizemlerini çözüyor. Sadece birkaç örnek vereceğim – Cramer'ın iki delik deneyini nasıl ele aldığını ve yorumunun Aspect deneyini nasıl anlamlı hale getirdiğini göstereceğim.

İki delik deneyinin özündeki gizemi açıklayacaksak bari şu işi tam yapalım da bu gizemin nihai versiyonunu, John Wheeler'ın tema üzerindeki çeşitlemesini, yani Üçüncü Bölüm'de ele alınan "gecikmiş seçim" deneyini açıklayalım. Hatırlarsanız bu deneyin bir versiyonunda bir ışık kaynağı iki delik düzeneğinden geçen bir dizi tek foton yayar. Öteki tarafta, varan fotonların konumunu kaydeden bir detektör perde vardır, fakat fotonlar daha yoldayken bunlar kapatılabilir, böylece fotonların iki yarık üzerine odaklanmış bir çift teleskoptan birine (biri bir yarığa, biri öteki yarığa odaklanmıştır) gitmesine izin verilir. Eğer perde inikse teleskoplar tek tek fotonların deliklerden birinden ya da ötekinden geçtiğini gözleyecektir; perde yukarıdaysa, fotonlar iki delikten de geçiyor gibi görünür ve perdede bir girişim örüntüsü oluşur. Bir de perde, fotonlar delikleri geçtikten *sonra* da indirilebilir, öyle ki hangi davranış biçimini benimseyeceklerine dair kararları, o kararı aldıktan sonraki bir olay tarafından belirleniyormuş gibi görünür.

Olayın Cramer versiyonunda, gecikmiş (bu açıklamanın amaçları bakımından "sahte zamanda" gözlenen) bir "teklif dalgası" deneydeki iki delikten de geçer. Perde yukarıdaysa dalga perde tarafından soğurulur, sonra düzeneğin *iki deliğinden birden* geçerek kaynağa geri giden bir ilerlemiş "teyit dalgası" tetikler. Son işlem iki olası yolda da (aslında Feynman olsaydı *her* olası yolda, diye vurgulardı) oluşur ve bir girişim meydana gelir.

Perde inikse, teklif dalgası yarıklara doğru tutulmuş teleskoplara geçer. Her teleskop sadece bir yarığa odaklandığı için, teklif dalgası teleskobun kendisiyle etkileşime girdiği zaman üretilen teyit dalgası kaynağa ancak teleskobun yöneltildiği delikten geçerek dönebilir. Ve tabii ki soğurma olayının bütün bir fotonu içermesi gerekir, fotonun bir parçasını değil. İki teleskobun da tutulduğu deliğe bir teyit dalgası göndermesi mümkün olsa da, kaynağın hangisini kabul edeceğini (rasgele) "seçmesi" gerekir ve neticede bir fotonun tek bir delikten geçişini içeren son bir işlem gerçekleşir. Foto-

nun evrilmekte olan durum vektörü perdenin inik mi yoksa kalkık mı olacağını "bilir" çünkü teyit dalgası gerçekten zamanda geriye yolculuk yapıp düzenekten geçer, fakat bütün işlem önce de olduğu gibi zamandışıdır.

Gözlemcinin ne zaman hangi deneyi yapacağı meselesinin artık önemi kalmamıştır. Gözlemci deney düzeneğini ve sınırlayıcı koşulları belirlemiştir, işlem de ona göre şekillenmiştir. Dahası, tespit olayının bir ölçüm (başka etkileşimlerden ayrı olarak) içermesinin artık önemi kalmamıştır ve dolayısıyla gözlemcinin de bu işlemde hiçbir özel rolü yoktur.[101]

Schrödinger'in kedisine (ve Wigner'in arkadaşına) ne olduğuna dair benzer bir açıklama bulmaya çalışarak hoşça vakit geçirebilirsiniz. Bir kere daha, önemli olan tamamlanmış işlemin sadece bir olasılığın (ölü kedi ya da canlı kedi) gerçek olmasına izin vermesidir ve "dalga fonksiyonunun çöküşü" gözlemcinin kutuya bakmasını beklemek zorunda olmadığından, kedinin yarı ölü yarı canlı olduğu bir zaman dilimi yoktur. İşlem yorumunun ne kadar güçlü ve anlaması kolay olduğunun göstergesidir bu. Ayrıntıları, size tek tek anlatmama gerek kalmadan çözeceğinizden eminim.

Peki ya Bell eşitsizliği, Einstein-Podolsky-Rosen paradoksu ve Aspect deneyi? Ne de olsa kuantum mekaniğinin anlamına duyulan ilgiyi 1980'lerde yeniden uyandıran buydu. Soğurma kuramı açısından bakınca neler olup bittiğini anlamak zor değil. İki foton göndermek üzere olan uyarılmış atomun çeşitli yönlere ve çeşitli olası kutuplanma durumlarına karşılık gelecek biçimde teklif dalgaları gönderdiğini hayal ediyoruz (hâlâ sahte zaman çerçevesinde). İşlem tamamlanır, fotonlar gerçekten yayılır, ama teyit niteliğindeki ilerlemiş dalgaların uygun gözlemci çiftten yayıcı atoma zamanda geriye gönderilmiş olması şartıyla. İşlem tamamlanır tamamlanmaz fotonlar yayılır ve gözlemlenir, uzayda birbirlerinden çok uzakta olsalar da fotonların kutuplanmalarının birbiriyle ilintilendiği bir çifte tespit olayı yaratır. Eğer teyit dalgaları izin verilen kutuplanma bağıntısıyla örtüşmezse, o zaman aynı işlemi "doğrulayamazlar" ve el sıkışmayı gerçekleştiremezler. Sahte-zaman perspektifinden, foton çifti onları soğuracak bir düzenleme yapılmadan *yayılamaz* ve yayılan fotonların kutuplanmalarını o soğurma düzeninin

101. Cramer, s. 673.

kendisi belirler, fotonlar soğurma henüz yer almadan "önce" yayılmış olsalar da. Atomun detektörlerin izin verdiği türden bir soğurmayla örtüşmeyen bir durumdaki fotonları yayması düpedüz imkânsızdır. Hatta, soğurma modelinde şayet fotonları soğurmak üzere bir anlaşma yapılmamışsa atom hiçbir foton yayamaz.

Galaksinin iki zıt ucuna ayrı uzay gemileriyle seyahat eden iki yavru kedinin durumu da aynıdır. Elektronun hangi yarım kutuda olduğunu, dolayısıyla hangi yavru kedinin yaşadığını hangisinin öldüğünü belirleyen gözlem zamanda geriye, deneyin başına geri gider, anında (daha doğrusu, zamandışı bir biçimde) yavru kedilerin gözlemlenmeden uzay gemilerinde kapalı oldukları bütün süre boyunca bulundukları durumları belirler.

Olay zincirinde özel olan tek bir bağlantı varsa, zinciri bitiren bağlantı o bağlantı değildir. Yayıcı, teklif dalgasından çeşitli teyit dalgaları aldıktan sonra onlardan birini öyle bir şekilde güçlendirir ki o belli teyit dalgası tamamlanmış bir işlem olarak gerçekliğe geçer ve asıl özel bağlantı da zincirin başında bulunan bu bağlantıdır. Zamandışı işlemin sonda "ne zaman"ı yoktur.[102]

Bütün kuantum fiziği muammalarını çözmedeki bu muhteşem başarı, sağduyuya ters gibi görünen tek bir fikri kabul etme pahasına elde edilmiştir: kuantum dalgasının bir kısmının gerçekten zamanda geriye yolculuk edebildiği fikrini. Bu ilk bakışta, nedenlerin daima sebep oldukları olaylardan önce gelmeleri gerektiğini söyleyen sağduyu sezgisiyle taban tabana zıttır. Ama yakından bakıldığında işlem yorumunun gerektirdiği zaman yolculuğu türünün gündelik hayattaki nedensellik kavramını ihlal etmediği görülür – evrendeki zamandışı el sıkışma da insan nitelikleri içinde en çok değer verdiğimiz özgür iradeyi illa ki ortadan kaldırmaz.

Zaman Yaratmak için Zaman Harcamak

Gündelik hayatta sonuçların daima nedenlerden sonra gelmesi bariz bir şeydir. Kafamda bir sonraki cümlenin ne olacağını düşünüp bilgisayarımın tuşlarına basarım ve ben tuşa bastıktan saniyenin

102. Cramer, 1986, s. 674.

bilmem kaçta biri gibi bir süre sonra o harf ekranda görünür. Kelimelerin önce ekranda görünmediği ve benim ne söylemek istediğimi onları okuduktan sonra bulmadığım doğru (ne yazık ki). Fakat zamanda geri giden ilerlemiş bir kuantum dalgası yardımıyla zamandışı bir el sıkışma gerçekleştiğinde bunun gündelik hayattaki mantıksal nedensellik örüntüsünü etkilemesi şart değil.

Cramer iki tür nedensellik olduğunu ileri sürüyor. Bunlara "güçlü" ve "zayıf" adlarını vermiş. "Zayıf nedensellik ilkesi" gündelik hayatta geçerlidir ("makroskobik" dünya) ve zamanla ilgili sağduyuya dayalı fikirlerimizin temelini oluşturur. Makroskobik bir nedenin hangi referans çerçevesi olursa olsun makroskobik etkilerinden önce gelmesi gerektiğini söyler. Makroskobik bilgi asla ışıktan daha hızlı ya da zamanda geriye aktarılamaz. Pek çok insan bunu kabul eder. Fakat Cramer bir de "güçlü nedensellik ilkesi" tanımlıyor. Buna göre bir neden bütün referans çerçevelerinde *bütün* etkilerinden önce gelmek zorundadır, öyle ki mikroskobik ölçekte (yani kuantum ölçeğinde) bile bilgi zamanda geriye ya da ışıktan daha hızlı gönderilemez. Buna genellikle zayıf nedensellik ilkesinin doğal uzantısı olarak bakılır; fakat Cramer güçlü nedensellik için hiçbir deneysel kanıt olmadığını belirtiyor. Aslında kimi deneysel kanıtlar –Bell eşitsizliği testleri– "mikroskobik" nedenselliğin ihlal edildiğini açıkça gösteriyor, hangi kuantum mekaniği yorumunu benimserseniz benimseyin. Soğurma kuramında daima güçlü nedensellik ihlalleri vardır; fakat soğurma gelecek yönünde daima tam olduğu sürece zayıf nedenselliğin ihlali söz konusu değildir.

İşlem yorumunun zamanı ele alışının sağduyuya ters düşmesine şaşırmamak gerekir, çünkü işlem yorumu açık bir biçimde görelilik kuramının etkilerini içerir, biz de bunların, iş zamanı tarif etmeye gelince nasıl sağduyuya ters olduğunu daha önce görmüştük. Kopenhag Yorumu'ysa zamanı klasik, "Newtoncu" biçimde ele alır, ki bu da Aspect deneyi gibi deneylerin sonuçlarını Kopenhag Yorumu'yla açıklama girişimlerindeki tutarsızlıkların baş sebebidir. Eğer ışık hızı sonsuz olsaydı sorun ortadan kalkardı; Bell eşitsizliğini içeren yerel ve yerbilmez süreç tanımları arasında hiçbir fark kalmazdı ve bildiğimiz Schrödinger denklemi olup bitenin doğru bir tarifi olurdu – bildiğimiz Schrödinger denklemi, aslında, ışık hızı sonsuzken doğru "göreci" denklemdir. Cramer görelilikle kuan-

tum mekaniği arasında oldukça ince bir bağ bulmuştur, yorumunun can damarı da budur.

Zamandışı el sıkışma özgür irade ihtimalini nasıl etkiler? İlk bakışta her şey geçmişle gelecek arasındaki bu haberleşmelerle sabitlenmiş gibi görünür. Yayılan her foton ne zaman nerede soğurulacağını önceden "bilir"; her kuantum olasılığı dalgası iki delik deneyinin delikleri içinden ışık hızıyla geçerken öteki yanda ne tür bir detektörün onu beklediğini "bilir". Yine fotonun gözüyle bakıldığında donmuş evren tablosuyla karşı karşıya kalırız. Burada ne zamanın ne de uzayın anlamı vardır ve olmuş ya da olacak her şey *şimdi*'dir.

Fakat hatırlarsanız bu, fotonun ya da ışık hızıyla hareket eden herhangi bir şeyin (mesela kuantum olasılık dalgası) perspektifinden böyledir. İnsanlar gibi makroskobik nesneler için zaman yeterince gerçektir. Benim referans çerçevemde, bir sonraki cümlenin ne olacağını düşünmek ya da öğle yemeği için şimdi mi yoksa yirmi dakika sonra mı ara vereceğime karar vermek için hâlâ zamanım var. Verdiğim kararlar zamandışı olarak birbirine kenetlenmiş kuantum bağlantıları ağı yaratabilir, öyle ki bir foton, dili olsaydı, benim gelecekteki hayatımı bu kararların nasıl etkileyeceğini söyleyebilirdi; fakat zayıf nedensellik ilkesi benim mikroskobik dünyadan makroskobik dünyaya böyle bir bilgi sızdırmamı engeller. Benim zaman çerçevemde bu kararlar hakiki özgür iradeyle verilmiştir ve bunların sonuçlarına ilişkin hiçbir kesin bilgi yoktur. Makroskobik dünyada, mikroskobik dünyanın zamandışı gerçekliğini inşa eden kararları almak (hem insan kararları hem de bir atomun bozunmasında yer alan türden kuantum "seçimleri") zaman alır. Yaşadığımız şey kuantum etkileşimlerinin temelini oluşturan zamandışı el sıkışmadan ziyade Cramer'ın "sahte zaman"ıdır.

En azından ben öyle görüyorum. Hikâyedeki başka her şey gibi bu da sadece bir analoji, bir mit ya da model. Bizim gündelik zaman anlayışımızın zamandışı kuantum dünyasıyla birbirine kenetlenme biçimi hakkında düşünmenin başka bir yolunu da bulabilirsiniz. Hatta John Bell'in muzip önerisine kulak vererek özgür irade diye bir şeyin olmadığını ve işlem yorumunun başarısının (bizim insan bakış açımızla) her şeyin önceden belirlenmişliğine kanıt olduğunu kabul etmeyi de tercih edebilirsiniz: Yani benim bu kitabı

yazma konusunda hiçbir seçeneğim yoktu, sizin de okumaktan başka seçeneğiniz yoktu. Fakat evrenin mikroskobik seviyedeki yerbilmezliği bizi belki rahatsız etse de, gündelik anlamda geçmiş, bugün ile gelecek arasındaki ilişkiyi anlamayı zorlaştırsa da unutmayın ki bu, sadece işlem yorumuna ait bir özellik değil, deneysel bir gerçek – ve bütün tatminkâr kuantum gerçekliği yorumlarında hesaba katılmalı. Dahası, uzay-zamanın farklı parçalarının zamandışı olarak tutarlı bir bütüne bağlanışı, İkinci Bölüm'de ele aldığımız, görelilik kuramından gelen süreğen uzay-zaman "tarihi" tablosuna gayet güzel uyuyor gibi. İşlem yorumunun başarısı büyük ölçüde bu meseleyi doğrudan ele alış biçimine ve kuantum dünyasının, Bell eşitsizliğini test eden deneylerle ortaya konmuş olan zamandışılığından çıkmış olmasına dayalıdır.

Bir kere daha vurguluyorum, *bütün* bu yorumlar mittir, kuantum seviyesinde olup biteni hayal etmemize ve sınanabilir tahminlerde bulunmamıza yardımcı koltuk değnekleridir. Hiçbiri tek başına "hakikat" değildir; daha çok *hepsi* "gerçek"tir, birbiriyle ters düşseler bile. Fakat Cramer'ın yorumu çağımızın miti olabilecek nitelikte; uygulaması ve neler olup bittiğini hayal etmek için kullanılması kolay; şansı da yaver giderse müstakbel bilim insanları için kuantum fiziği hakkında standart düşünme biçimi olarak Kopenhag Yorumu'nun yerini alabilir.

Yeni başlayanlara (yani Kopenhag Yorumu'yla çoktan bozulmamış olanlara) kuantum fiziği öğretmenin kesinlikle harikulade bir yolu. Cramer'ın dediği gibi:

> Kopenhag Yorumu'ndan uzaklaşmak elli yılı aşkın süredir kuantum mekaniği öğretimindeki geleneksel rolünden dolayı özellikle zor olabilir.
>
> Ne var ki fizik süreçlerine getirilecek yeni yorumsal kavrayışların değeri azımsanmamalıdır. Fiziğin pek çok alanındaki tecrübeler göstermiştir ki ilerleme, yeni fikirler ve yaklaşımlar fiziksel fenomenleri zihinde açıkça canlandırma yeteneğiyle kamçılanır.[103]

Fred Hoyle, 1977'de ilke olarak bütün evreni içine alan etkileşimler çerçevesinde kuantum deneylerinin sonucunun anlaşılma güçlüğünü ele alırken şu yorumu yapmıştır: "Yine de başarı bir gün gelebilir, fakat sadece fiziğin yerbilmez biçiminden, şu anda kesin-

103. 1986, s. 681.

likle popüler olmayan fizik türünden."[104] Hoyle'un ileriyi gören yorumu ve Cramer'ın umudu, Çu'nun kütle çekiminin doğası üzerine yaptığı türden çalışmalarda gerçekleşme belirtileri gösteriyor. Kuantum mekaniği hikâyesi burada bitmiyor, daha ziyade hikâyede yeni bir bölüm açılıyor. Fakat hikâyenin bu kısmını son bir ironiyle bitirmek istiyorum.

Yirminci yüzyılın bütün büyük fizikçilerinin içinde, standart biçimiyle kuantum mekaniğinin özünden gelen anlaşılmazlığını en açık ve en sık biçimde ifade eden Richard Feynman'dı. Örneğin 1960'ların ortasında *Fizik Yasaları Üzerine* adlı kitabında şöyle yazıyordu:

> Bir zamanlar gazeteler görelilik kuramını anlayan sadece on iki adam olduğunu söylüyordu. Ben böyle bir zamanın olduğuna hiç inanmıyorum. Sadece tek bir adamın anladığı bir zaman belki vardı, çünkü onun makalesi yayımlanmadan önce konuyu anlayan tek adam oydu. Fakat insanlar makaleyi okuduktan sonra pek çok kişi göreliliği şu ya da bu şekilde anlamıştır ve bunların sayısı kesinlikle on ikiden fazladır. Öte yandan, kimsenin kuantum mekaniğini anlamadığını sanırım rahatlıkla söyleyebilirim ... Elinizden geldiğince kendinize "Ama nasıl öyle olabilir?" diye sormayın, çünkü sorarsanız "oluktan aşağı" kayıp kimsenin henüz kaçamadığı bir çıkmaz sokağa girersiniz. Kimse nasıl öyle olabildiğini bilmiyor.[105]

Buradaki ironi elbette o çıkmaz sokaktan kaçma yolunun, Feynman'ın bu yorumu yapmasından yirmi yıl önce bulduğu ışık kuramından çıkmış olmasıdır. Fakat bunun açığa çıkması için bir otuz yıl daha geçmesi gerekmiştir. Sadece çağımızın bir miti olabilir, fakat John Cramer'ın işlem yorumunun müthiş tarafı, "Ama nasıl öyle olabilir?" sorusunu sormanıza ve "oluktan aşağı" kayıp gitmeyi içermeyen yalın, kolay anlaşılır bir cevap bulmanıza izin vermesidir. Bir kuantum mekaniği yorumundan başka ne isteyebilirsiniz ki?

104. Hoyle, *Ten Faces of the Universe*, Londra: Heinemann, 1977, s. 128.
105. s. 129; Londra: BBC Publications, 1965 (1964'te verilen konferanslardan derlenmiştir; 1967'de ve daha sonra MIT Press tarafından defalarca yeniden basılmıştır).

—

Kaynakça

Metin içerisinde genellikle teknik kitaplar ve bilimsel makalelere yaptığım özel atıfların yanı sıra, kuantum gerçekliğinin anlamı ve fiziğin ne olduğu hakkındaki fikirlerimi geliştirmede özellikle faydalı bulduğum (bazı durumlarda ilham aldığım) kitapları da listeledim. Bu kaynakçaya kendi kitaplarımdan bazılarını da dahil ettim çünkü benim kendi fikirlerimin son yirmi yılda nasıl gelişip değiştiğini gösteriyorlar.

David Albert, *Quantum Mechanics and Experience*, Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1992.
Kuantum mekaniğinin "birçok zihin" yorumunu savunuyor, fakat ben hiç ikna olmadım. Bu fikir ilginizi çekiyorsa, bu savın sizi ikna edip etmeyeceğini görmek için doğru yer burası.

Hans von Baeyer, *Taming the Atom*, Londra: Viking, 1992.
Atom ve moleküller dünyası hakkında iyi bir fikir edinmenizi sağlıyor. Ayrıca tek atomların, DNA moleküllerinin ve mikrodünyanın başka harikalarının baş döndürücü fotoğrafları da var. Yalnız bazı hatalara dikkat edin. Mesela helyum atomunun yapısının "açıklaması"na.

Jim Baggott, *The Meaning of Quantum Theory*, Oxford: Oxford University Press, 1992.
Kuantum yerbilmezliğinin öneminden habersiz mutlu bir hayat sürerken, ta 1987'de, Bell teoremini keşfedince ürkmüş olan bir fizikçinin yazdığı oldukça teknik bir anlatım; henüz keşfettiği bütün gizemler karşısında duyduğu naif hayreti kitabı çok çekici kılıyor, tabii denklemlerden ayıklayıp okursanız.

Ralph Baierlein, *Newton to Einstein*, Cambridge, Cambridge University Press, 1992.
Bilimde uzmanlaşmamış lisans öğrencilerine hitap eden (dolayısıyla konuyla ilgilenen herkesin nispeten kolay anlayabileceği) bu kitap ışığın parçacık ve dalga olarak ikili doğasını ele alıyor ve özel görelilik kuramının kaba hatlarını çiziyor. Yine de bir ders kitabı, fakat pek çok ders kitabından daha anlaşılır.

J. S. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge, Cambridge University Press, 1987.
John Bell'in, kuantum kuramının kavramsal ve felsefi sorunları üzerine yazdığı *bütün* makalelerinin toplamı. Bazısı oldukça anlaşılır, bazısı son derece teknik.

Paul Davies, *Other Worlds*, Londra: Pelican, 1988, orijinal basım Londra: J. M. Dent, 1980.
Kuantum fikirlerinin Aspect deneyi gerçekleştirilmeden önce yazılmış iyi ama biraz zamanı geçmiş bir özeti. Davies "birçok dünya" kuramını benimseyen bir genel bakış sunuyor ve dünyanın şimdi olduğu halde olmasını sağlayan antropik "tesadüfleri" ele alıyor.

Paul Davies ve J. R. Brown (haz.), *The Ghost in the Atom*, Cambridge, Cambridge University Press, 1986.
BBC radyo dizisi için yapılmış söyleşilere dayanan, kuantum kuramının anlamının farklı yorumlarının "birinci ağızdan" versiyonları. Seçkin uzmanlar birbiriyle bağdaşmayan tezat ihtimalleri savunuyorlar, hepsi de aynı kanıta dayanarak! Fizikçilerin kuantum mekaniğinin anlamını kavrayışlarındaki kafa karışıklığına hoş bir örnek.

David Deutsch, *The Fabric of Reality*, Londra: Viking, 1995.
Kuantum gerçekliğine dair Hugh Everett'in "birçok dünya" kuramından geliştirilmiş çok kişisel bir görüş. Zamanın doğasına dair de ilgi uyandırıcı fikirler var.

J. W. Dunne, *An Experiment with Time* (3. baskı), Londra: Faber & Faber, 1934.
Zamanın doğasını biraz mistik bir biçimde ele alıyor. Bu yaklaşım gündelik hayattaki zamanın "akış"ını ölçmek için ikinci bir zaman tabakasına kaçınılmaz olarak ihtiyaç duyuyor, ikinci tabakayı ölçmek için de bir üçüncü tabaka gerekiyor ve böyle sonsuza dek gidiyor.

C. W. F. Everitt, *James Clerk Maxwell*, New York: Scribner's, 1975.
Maxwell'in hayatı ve çalışmalarını anlaşılır biçimde anlatan kolay okunur bir kitap.

J. Fauvel, R. Flood, M. Shortland ve R. Wilson (haz.), *Let Newton Be!*, Oxford: Oxford University Press, 1988.
Newton ve eserleri hakkında kolay anlaşılır makalelerden oluşan bir derleme.

Richard Feynman, *QED: The Strange Theory of Light and Matter*, Londra: Penguin, 1990; Türkçesi: *Kuantum Elektrodinamiği: Işık ve Maddenin Tuhaf Kuramı*, çev. Ömür Akyüz, İstanbul: Pan, 1997.

İlk 1985'te yayımlanan ve Feynman'ın Los Angeles'ta bilim alanının dışındaki bir dinleyici kitlesine hitaben verdiği bir dizi konferansa dayanan kitabın son basımı. Feynman'ın kuantum fiziğinin nasıl "işlediği"ni zihinde canlandırarak açıklayışına harika bir örnek.

Richard Feynman, *The Character of Physical Law*, Londra: Penguin, 1992; Türkçesi: *Fizik Yasaları Üzerine*, çev. Nermin Ank, Ankara: Tübitak, 2005.
BBC'nin yayımladığı bir dizi dersten alınmış, ilk defa 1965'te yayımlanmış kitabın yeni baskısı. Kuantum kuramı hakkında bir bölümü de var fakat kitabın tamamı kesinlikle okumaya değer – hakiki Feynman "sesi".

Richard Feynman, *Six Easy Pieces* Mass.: Addison-Wesley, 1995; Türkçesi: *Altı Kolay Parça*, çev. Celal Kapkın ve Tolga Birkandan, İstanbul: Evrim, 2002.
Feynman'ın ünlü fizik dersinden (bkz. aşağı) giriş derslerinin ilk altısı, kuantum fiziğine giriş de var.

Richard Feynman, Robert Leighton ve Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics, Vol. III*, Addison-Wesley, 1965.
Feynman'ın kuantum kuramını ele alan ünlü derslerinin olduğu cilt. Lisans seviyesinde bir kitap, konuyla ciddi olarak ilgilenen herkes için.

Richard Feynman ve Steven Weinberg, *Elementary Particles and the Laws of Physics*, Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
1980'lerin ortalarında Paul Dirac'ın onuruna Cambridge'de verilen iki konferansın metinleri. Fizikçilerin nasıl düşündüğü hakkında çok iyi fikir veriyor.

Kathleen Freeman, *Ancilla to the Pre-Socratic Philosopher*, Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1983.
Empedokles'in eserinden Birinci Bölüm'de atıfta bulunduğum parçaları içeriyor.

James Gleick, *Genius*, Londra: Little Brown, 1992.
Yirminci yüzyıl fiziği bağlamında Richard Feynman'ın hayatı ve eserleri hakkında kapsamlı bir çalışma.

John Gribbin, *In Search of Schrödinger's Cat*, New York: Bantam ve Londra: Black Swan, 1984; Türkçesi: *Schrödinger'in Kedisinin Peşinde*, çev. Nedim Çatlı, İstanbul: Metis, 2004.
Elinizdeki kitabın başladığı yerde bitiyor. Kuantum kuramının nasıl ortaya çıktığını sokaktaki adama en iyi anlatan kılavuz (tabii öyle diyeceğim, değil mi?).

John Gribbin, *In Search of the Big Bang*, New York: Bantam ve Londra: Black Swan, 1986.
Evrenin kökeniyle ilgili standart kuram, kuantum fiziği hakkındaki fikirler bağlamında ele alınmış.

John Gribbin, *In Search of the Edge of Time*, New York: Harmony ve Londra: Black Swan, 1992.
Görelilik kuramının çıkışını ve içerimlerini zamanı anlama ve zaman yolculuğu olasılığını da ele alarak anlatıyorum.

John Gribbin, *In the Beginning*, New York: Little Brown ve Londra: Viking, 1993.
Evrenin kökeni hakkındaki en son fikirler ve Wheeler-Feynman soğurma kuramının gereklerine uygun bir şekilde "kapalı" olduğuna dair delil.

John ve Mary Gribbin, *Time and Space*, Londra: Dorling Kindersley, 1994; Türkçesi: *Zaman ve Uzay*, çev. Gürsel Tanrıöver, Ankara: Tübitak, 2005.
Einstein'ın görelilik kuramlarının basit, bol resimli, çok az metinli anlaşılabilir bir açıklaması. İkinci Bölüm'deki bazı fikirlere açıklık getirmede yardımcı olabilir!

Herman Haken, Anders Karlqvist ve Uno Svedin (haz.), *The Machine as Metaphor and Tool*, Berlin: Springer-Verlag, 1993.
Mayıs 1990'da İsveç'in Abisko kentinde düzenlenen bir atölyeden geliştirilmiş makalelerden oluşan bir derleme. Bilimsel dünya görüşünü de içeren çeşitli bağlamlarda makine ve kullanımını bir metafor olarak ele alma teması üzerine kurulu. Çoğunlukla beyin hakkında, fakat Beşinci Bölüm'de işlediğim temalarla ilgili.

Nick Herbert, *Quantum Reality*, Londra: Rider, 1985.
Kuantum kuramının farklı yorumlarının sürükleyici fakat biraz eskimiş bir açıklaması.

Roger Jones, *Physics as Metaphor*, Minneapolis, Minn.: University of Minnesota, 1982.
Fizikçilerin dünyaya nasıl baktıklarını ele alıyor ve modellerle gerçeklik arasındaki yaygın varsayımları sorguluyor.

Martin Krieger, *Doing Physics*, Bloomington, Ind.: Indiana University Press, 1992.
Fiziğin sadece analoji ve metafor üzerine kurulu olmayıp, aynı zamanda bir analoji ve metafor sistemi –başka deyişle kurmaca– *olduğunu*, bildiğim bütün anlatımlardan daha açık ve güçlü açıklayan ufuk açıcı bir kitap. Özenle işlenmiş bu çalışma dikkatli bir inceleme istiyor; fakat gereğini yaparsanız bilim dünyasını bir daha asla aynı ışık altında göremezsiniz.

Thomas Kuhn, *The Structure of Scientific Revolution*, Chicago: University of Chicago Press, 1970.
Bilim insanlarının nasıl çalıştığı ve düşündüğü –ayrıca nasıl ve neden bazen fikirlerini değiştirdikleri– hakkında klasik bir eser.

Jeab-Pierre Maury, *Newton: Understanding the Cosmos*, Londra: Thames & Hudson, 1992.
İlk kez 1990'da çıkmış Fransızca bir kitabın İngilizce çevirisi. Kolay okunan metni, renkli resimleri ve 144 sayfalık cep boyutuyla Newton ve eserleri için şu ana kadarki en iyi "çabuk kılavuz".

Dugald Murdoch, *Niels Bohr's Philosophy of Physics*, Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
Bohr'un kuantum kuramına katkısını ve özellikle de Kopenhag Yorumu olarak bildiğimiz şeyle tam olarak neyi kastettiğini akademik bir bakışla değerlendiriyor. Okuması her zaman kolay değil, fakat işin gerçekten zor kısmına dalmak isteyenler için iyi bir kaynak.

Heinz Pagels, *The Cosmic Code*, Londra: Michael Joseph, 1982.
Kuantum dünyasının (özellikle de Kopenhag Yorumu'nun) tuhaflığını açık ve ilginç bir şekilde anlatıyor. Aspect deneyinin sonuçlarının ilham verdiği alternatif yorumlara duyulan ilgi dalgasından hemen önce, muazzam bir iletişim yeteneği olan seçkin bir fizikçi tarafından yazılmış.

Roger Penrose, *The Emperor's New Mind*, Oxford: Oxford University Press, 1989; Türkçesi: *Kralın Yeni Usu*, çev. Tekin Dereli, Ankara: Tübitak, 1997-1999.
Penrose gerçek anlamda akıllı bilgisayarların var olamayacağı görüşünü güçlendirmek için okuru kuantum kuramı da dahil olmak üzere modern fiziğin büyük bir kısmını içeren bir yolculuğa çıkarıyor. Bazı yerlerde ağırlaşıyor, bazı yerlerde coşkulu, genellikle kavgacı, ama kesinlikle okumaya değer.

Andrew Pickering, *Constructing Quarks*, Edinburgh: Edinburgh University Press, 1984.
Modern parçacık fiziğinin büyüleyici bir anlatımı, bazı yerlerde ağır kaçıyor fakat hikâyeyi ve nihai (?) kuramı, bilim insanlarının gizli bir hakikati ortaya çıkarmalarının değil, gerçekliği deneyler ve kuramlardan yaratmalarının sonucu olarak sunuyor. Dikkatli okunduğunda karşılığını fazlasıyla alırsınız.

William Poundstone, *Labyrinths of Reason*, New York: Anchor Books, 1988.
Fizikçilerin dünya hakkında düşünüş tarzlarına kolay anlaşılır bir bakış.

Ilya Prigogine ve Isabelle Stengers, *Order out of Chaos*, Londra: Heinemann, 1984; Türkçesi: *Kaostan Düzene*, çev. Senai Demirci, İstanbul: İz, 2007.
Prigogine'nin karmaşıklık ve zaman oku fikirlerine iyi bir giriş niteliğinde, fakat bazı yerleri çok ağır. Prigogine'nin tek başına yazdığı *From Being to Becoming*'de (San Francisco: Freeman, 1980) daha da ağır bir versiyonunu bulmak mümkün.

Prigogine'nin fikirleri ilgi uyandıran düşüncelerle dolu bir dizi kitapta ayrıntılarıyla anlatılmıştır, fakat ben bazı yerlerinin çok ağır olduğunu düşünüyorum. Neyse ki bu fikirlerin kuantum dünyasıyla olası ilgisi Alastair Rae

tarafından *Quantum Physics: Illusion or Reality?* adlı kitabında (bkz. aşağı) gayet açıklayıcı bir biçimde ele alındı. Hızlı bir göz atmak için öneririm.

Alastair Rae, *Quantum Physics: Illusion or Reality?*, Cambridge, Cambridge University Press, 1986; Türkçesi: *Kuantum Fiziği: Yanılsama mı, Gerçek mi?*, çev. Yurdahan Güler, İstanbul: Evrim, 2000.
Sokaktaki adam için standart, geleneksel sayılabilecek bir kılavuz; Ilya Prigogine'nin eserlerini Prigogine'nin kendi kitaplarından daha anlaşılır olarak anlattığı bir bölüm de içeriyor.

Henry Stapp, *Mind, Matter, and Quantum Mechanics*, Berlin: Springer-Verlag, 1993.
Bazı yerlerde zor olan bu kitabın avantajı Stapp'ın makalelerinden oluşan bir derleme olması. Hepsi kuantum kuramı ve bilinç sorununa dair. Fikirleri biraz farklı biçimlerde defalarca sunulduğu için azimli okur zamanla olup bitenlerin tadına varabilir. Dördüncü Bölüm'de değindiğim zihin ve maddenin gizeminin derinliklerine inmek isteyenler için zahmete değer.

John Tyndall, *On Light*, Londra: Longman, 1873.
Tyndall'ın ABD turunda verdiği konferanslardan oluşan çok hoş bir kitap. Viktorya dönemi bilim dünyasına, gökyüzünün neden mavi olduğunu ilk anlayan adam tarafından açılan ilginç bir pencere.

Robert Weber, *Pioneers of Science* (2. basım), Bristol: Adam Hilger, 1988.
Fizikte Nobel Ödülü kazanan herkes hakkında özet bilgi; ilkinden (Wilhelm Röntgen, 1901) 1987'deki Alex Müller ve Georg Bednorz'a kadar.

Richard Westfall, *Never at Rest*, Cambridge, Cambridge University Press, 1980.
Newton'un en güvenilir biyografisi. Aynı kitabın kısaltılmış versiyonu *The Life of Isaac Newton* adıyla CUP tarafından 1993'te yayımlandı, kavraması daha kolay olabilir, fakat ilki çok daha iyi.

John Wheeler ve Wojciech Zurek, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton: Princeton University Press, 1983.
Kuantum kuramının anlamını sorgulayan klasik makalelerin yeni basımlarının müthiş bir derlemesi. EPR makalesi, Schrödinger'in kedisinin ilk ortaya çıkışı, Bohm, Bell ve Aspect, hepsi burada, başka pek çok bilim insanı da (ne yazık ki Cramer'ı es geçmiş). İçerdiği az miktarda yorum çoğunlukla epey teknik; bir kütüphanede içine dalmaya değer.

Arthur Zajonc, *Catching the Light*, Londra: Bantam, 1993.
Işığın tarihine büyüleyici bir bakış. Bilimin yanı sıra sanatsal ve şiirsel izlenimler de yer alıyor.

Sözlükçe

TÜRKÇE-İNGİLİZCE

alan kuramı	field theory
atarca	pulsar
atom tayfı	atomic spectrum
ayar simetrisi	gauge symmetry
bağıntı	correlation
bozunma	decay
buçuklu	half-integer
bütüncü	holistic
büzülme	contraction
çakışmasız	anticoincidence
çekirdek	nucleus
çok katlı yapı	multiplet
dağıtma ızgarası	diffraction grating
değişme özelliği olmaması	noncommutativity
darbe	impulse
demet	beam
doğrusal kutuplanmış	plane polarized, linear polarized
dolanık	entangled
dolanıklık	entanglement
durağan dalga	standing wave
durgun kütle	rest mass
durum	state
elektromanyetizma	electromagnetism
esir	ether
eşevreli ışıma	coherent radiation
eşevresizlik	decoherence
eşlenik değişken	conjugate variable

etkileşim	interaction
evrenbilimci	cosmologist
evren hattı	worldline
fosforışı	phosphorescence
gecikmiş dalgalar	retarded waves
geçmişlerin toplamı	sum-over-histories
girişim	interference
gizli değişkenler	hidden variables
görelilik kuramı	relativity theory
hareket	action
hız (yönlü hız)	velocity
hızlandırıcı	accelerator
ışık bölücü	beam splitter
ışık saçan esir	luminiferous ether
ışık yayan diyot	LED
ışıma	radiation
içerim	implication
ikici	dualistic
ikili atarca	binary pulsar
ikili yapı	doublet
ilerlemiş dalgalar	advanced waves
kara cisim	blackbody
kara madde	dark matter
kararlı	stable
karşı-madde	anti-matter
katkılanmış	doped
kesilme noktası	cut off
kırılma	refraction
kırınım	diffraction
kutuplanma	polarization
kutuplayıcı	polarizer
lazer	LASER
mazer	MASER
momentum	momentum

moment	moment
morötesi felaket	ultraviolet catastrophe
nicemleme	quantization
oyuk ışıması	cavity radiation
öngörü	prediction
örüntü	pattern
paketçik	kuantum
parçacık	particle
parçacık fiziği	particle physics
pırıltılı sayaç	scintillator
radyoaktiflik	radioactivity
sahte rasgele	pseudo-random
serbestlik derecesi	degree of freedom
soğurmak	absorb
sürat	speed
tamamlayıcılık	complementarity
tanecik	corpuscle
tayf	spectrum
tayf ölçüm uzmanı	spectroscopist
tayf ölçümü	spectroscopy
tekillik	singularity
tekli yapı	singlet
temel durum	ground state
titreşim kipi	mode of vibration
tümleşik devre	integrated circuit
uzay-zaman süreklisi	space-time continuum
yapıcı girişim	constructive interference
yayılma	emission
yaymak	emit
yerbilmezlik	nonlocality
yersizleştirme	delocalization
yıkıcı girişim	destructive interference
yol integrali	path-integral
yük (elektrik)	charge

İNGİLİZCE-TÜRKÇE

absorb	soğurmak
accelerator	hızlandırıcı
action	hareket
advanced waves	ilerlemiş dalgalar
anticoincidence	çakışmasız
anti-matter	karşı-madde
atomic spectrum	atom tayfı
beam	demet
beam splitter	ışık bölücü
binary pulsar	ikili atarca
blackbody	kara cisim
cavity radiation	oyuk ışıması
charge	yük (elektrik)
coherent radiation	eşevreli ışıma
complementarity	tamamlayıcılık
conjugate variable	eşlenik değişken
constructive interference	yapıcı girişim
contraction	büzülme
corpuscle	tanecik
correlation	bağıntı
cosmologist	evrenbilimci
cutoff	kesilme noktası
dark matter	kara madde
decay	bozunma
decoherence	eşevresizlik
degree of freedom	serbestlik derecesi
delocalization	yersizleştirme
destructive interference	yıkıcı girişim
diffraction	kırınım
diffraction grating	dağıtma ızgarası
doped	katkılanmış

doublet	ikili yapı
dualistic	ikici
electromagnetism	elektromanyetizma
emission	yayılma
emit	yaymak
entangled	dolanık
entanglement	dolanıklık
ether	esir
field theory	alan kuramı
gauge symmetry	ayar simetrisi
ground state	temel durum
half-integer	buçuklu
hidden variables	gizli değişkenler
holistic	bütüncü
implication	içerim
impulse	darbe
integrated circuit	tümleşik devre
interaction	etkileşim
interference	girişim
kuantum	paketçik
LASER	lazer
LED	ışık yayan diyot
luminiferous ether	ışık saçan esir
MASER	mazer
mode of vibration	titreşim kipi
moment	moment
momentum	momentum
multiplet	çok katlı yapı
noncommutativity	değişme özelliği olmaması
nonlocality	yerbilmezlik
nucleus	çekirdek
particle	parçacık
particle physics	parçacık fiziği
path-integral	yol integrali

pattern	örüntü
phosphorescence	fosforışı
plane polarized, linear polarized	doğrusal kutuplanmış
polarization	kutuplanma
polarizer	kutuplayıcı
prediction	öngörü
pseudo-random	sahte rasgele
pulsar	atarca
quantization	nicemleme
quantum number	kuantum sayısı
radiation	ışıma
radioactivity	radyoaktiflik
refraction	kırılma
relativity theory	görelilik kuramı
rest mass	durgun kütle
retarded waves	gecikmiş dalgalar
scintillator	pırıltılı sayaç
singlet	tekli yapı
singularity	tekillik
space-time continuum	uzay-zaman süreklisi
spectroscopist	tayf ölçüm uzmanı
spectroscopy	tayf ölçümü
spectrum	tayf
speed	sürat
stable	kararlı
standing wave	durağan dalga
state	durum
sum-over-histories	geçmişlerin toplamı
ultraviolet catastrophe	morötesi felaket
velocity	hız (yönlü hız)
worldline	evren hattı

Dizin

metis bilim | 6

Bilim tarihinin şüphesiz en meşhur kedilerinden olan Schrödinger'in kedisi bilim insanlarının zihnini yeterince kurcalamamış gibi, şimdi de bu adsız kahramanın ikiz yavrularının rol aldığı bir başka "düşünce deneyi" bizleri benzer bir muammayla karşı karşıya bırakıyor.

İngiliz bilim yazarı John Gribbin, Schrödinger'in Kedisinin Peşinde adlı başarılı kitabının devamı niteliğinde olan bu kitapta, kuantum dünyasının "tuhaflıklarını" irdelemeye ve bunlara ilişkin farklı yorumları ele almaya devam ediyor. Gribbin'in kendi ifadesiyle, "kuantum tartışmasını anlamak için bilmeniz gereken her şeyi burada bulacaksınız; aynı anda iki ayrı yerde olabilen fotonlar gibi görünüşte paradoksal fenomenleri, aynı anda iki yöne giden atomları, ışık hızıyla hareket eden bir parçacık için zamanın nasıl durduğunu ve kuantum kuramının Uzay Yolu'vari bir ışınlamayı mümkün kılabileceğine dair ciddi bir yorumu okuyacaksınız".

Gribbin'in gayet anlaşılır ve esprili bir dille kaleme aldığı bu ilginç kitabı kuantum dünyasıyla uzaktan yakından ilgilenen tüm okurlarımıza tavsiye ediyoruz.



Metis Bilim
ISBN-13: 978-975-342-664-0



Metis Yayınları
www.metiskitap.com